

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**

**HERIK KAUE COELHO**

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA NO PROCESSO DE  
SECAGEM DE PASTA EM LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO ESFERAS DE VIDRO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2018**

**HERIK KAUE COELHO**

**SECAGEM DE PASTA EM LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO MEDIDAS  
DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Regina Parise

**PONTA GROSSA**

**2018**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
1.1.1 Departamento Acadêmico de Engenharia  
Química



---

### TERMO DE APROVAÇÃO

Secagem de Pasta em Leito Fluidizado Utilizando Medidas de Flutuação de Pressão

Por

HERIK KAUE COELHO

Monografia apresentada no dia 23 de novembro de 2018 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Everton Moraes Matos  
(UTFPR)

---

Flávia Tramontin Silveira Schaffka  
(Doutoranda Unicamp-SP)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Regina Parise  
(UTFPR)  
Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

**O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.**

Folha destinada à inclusão da **Ficha Catalográfica** (elemento obrigatório somente para teses e dissertações) a ser solicitada ao Departamento de Biblioteca da UTFPR e posteriormente impressa no verso da Folha de Rosto (folha anterior).

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva do Departamento de Biblioteca da UTFPR.

Dedico esse trabalho a minha família,  
amigos e professores que tanto  
contribuíram para que eu pudesse concluir  
mais essa etapa da minha graduação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe **Amara Maria do Nascimento Coelho**, por todo apoio, compreensão e suporte durante toda a jornada da graduação sem os quais eu não teria conseguido chegar até aqui.

Agradeço profundamente a todos os meus amigos que, na ausência da família, foram o suporte que precisei e todo o apoio necessário para que eu conseguisse atingir os meus objetivos.

Um muito obrigado especial para **Bruna Almeida Alves**, minha amiga, irmã, companheira e a maior família que tive nesses últimos anos e que agora, mesmo longe, sempre foi e sempre vai ser um dos maiores apoios sentimentais e profissionais que já tive e sem o qual a jornada até esse momento seria muito mais dispendiosa.

O mais profundo dos agradecimentos à minha orientadora Professora Doutora **Maria Regina Parise**, por toda sua paciência, compreensão, empatia, apoio, ensinamentos e dedicação que teve comigo durante todos os anos de graduação.

Um muito obrigado à Mestre **Flávia Tramontin Silveira Schaffka**, por toda sua disponibilidade e ajuda na continuação dos estudos relacionados ao tema desse trabalho e teve participação fundamental para que o mesmo fosse concluído.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma me impulsionaram a concluir mais essa etapa da minha vida. Serei eternamente grato a todos vocês.

## RESUMO

COELHO, Herik Kaue. **Secagem de Pasta em Leito Fluidizado Utilizando Medidas de Flutuação de Pressão**. 2018. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Com intuito de expandir os conhecimentos sobre o comportamento fluidodinâmico do processo de secagem de pasta em leito fluidizado, foi utilizada a análise espectral Gaussiana para avaliar e identificar a região de mínima fluidização em um sistema gás-sólido utilizando esferas de vidro como partícula inerte e solução de carbonato de cálcio como suspensão diluída. O estudo consistiu na avaliação da estabilidade do sistema e no fenômeno de defluidização. Nos experimentos de secagem realizados também foi avaliado os perfis de temperatura do sistema ao longo do tempo, a força de secagem e a evolução do coeficiente de correlação ( $R^2$ ). Os materiais utilizados nos ensaios experimentais consistiram na utilização de uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. O material inerte utilizado foi esfera de vidro de 925  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio, o qual foi atomizado com solução de carbonato de cálcio de 9% e 15% em massa, e vazões de atomização de 11 mL/min e 15 mL/min. Nessas condições, os resultados obtidos mostraram que a utilização da análise espectral Gaussiana foi efetiva na detecção da região de defluidização. A análise dos perfis de temperatura mostrou a tendência de equilíbrio térmico entre as temperaturas do leito, temperatura de bulbo úmido na saída e a temperatura de entrada de ar no sistema. A força de secagem teve comportamento característico e reprodutível indicando a tendência à aglomeração do material particulado. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) apresentou variação significativa na zona de defluidização do leito, podendo ser utilizado como um parâmetro alternativo de identificação da região de mínima fluidização.

**Palavras-chave:** Secagem de Pasta. Análise de Flutuação de Pressão. Leito Fluidizado Gás-Sólido. Análise espectral Gaussiana.

## ABSTRACT

COELHO, Herik Kaue. **Fluidized Bed Paste Drying Using Pressure Fluctuation Measurements**. 2018. 52 f. Undergraduate coursework (Bachelor of Chemical Engineering) – Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Gaussian spectral analysis was used to evaluate and identify the region of minimum fluidization in a gas-solid system using glass beads as an inert particle and a solution of calcium carbonate as a diluted suspension solution. This study was aimed to expand the knowledge about the fluid dynamics behavior inside a fluidized bed during a drying process. The study consisted in evaluating the stability of the system and the phenomenon of defluidization. In the drying experiments performed, the temperature profiles of the system over time, the drying force and the evolution of the correlation coefficient ( $R^2$ ) were also evaluated. The materials used in the experimental tests carried out in a cylindrical Plexiglas column of 0.11 m in inner diameter and 1.0 m in height. Glass beads with mean particle diameter of 925  $\mu\text{m}$  were atomized with 9% and 15% calcium carbonate solution with volumetric flow rates of 11 mL/min and 15 mL/min. In these conditions, the results obtained shows that the use of Gaussian spectral analysis was effective in detecting the region of defluidization. Analysis of the temperature profiles shows the trend of thermal equilibrium between bed temperatures, wet bulb temperature at the outlet and the air inlet temperature in the system. The drying force had a characteristic and reproducible behavior indicating the agglomeration tendency of the particulate material. The correlation coefficient ( $R^2$ ) showed a significant variation in the bed defluidization zone and it could be used as an alternative parameter to identify the region of minimum fluidization.

**Keywords:** Paste Drying. Pressure Fluctuation Analysis. Gas-Solid Fluidized Bed. Gaussian Spectral Analysis.

## LISTA DE SIMBOLOS

$A$	Amplitude de modulação	[-]
$A_e(f_k)$	Amplitude espectral medida	[Pa]
$C_{susp}$	Concentração da suspensão	[%]
$d_p$	Diâmetro médio da partícula	[ $\mu\text{m}$ ]
$DF$	Força de secagem	[Pa]
$e_k$	Resíduo da curva de ajuste	[-]
$f_c$	Frequência Central	[Hz]
$f_k$	Frequência do sinal	[Hz]
$G(f_k)$	Curva de distribuição normal	[-]
$h_L$	Altura do leito fixo	[m]
$N$	Número de medidas de pressão	[-]
$T_{bs, in}$	Temperatura de bulbo seco na entrada	[°C]
$T_{bs, out}$	Temperatura de bulbo seco na saída	[°C]
$T_{bu}$	Temperatura de bulbo úmido na saída	[°C]
$T_{leito}$	Temperatura do leito	[°C]
$U_{mb}$	Velocidade de mínimo borbulhamento	[m/s]
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
$U_o$	Velocidade superficial do ar	[m/s]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO.....	15
3.1.1 Regimes de Fluidização .....	15
3.1.2 Caracterização das Partículas .....	17
3.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização .....	19
3.2 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO.....	21
3.3 SECAGEM DE PASTA .....	23
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
4.1 MATERIAIS .....	27
4.1.1 Análise Granulométrica .....	27
4.1.2 Diâmetro Médio de Sauter.....	28
4.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL .....	29
4.3 ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA .....	30
4.4 ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	31
4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
5.1 OBTENÇÃO DA CURVA FLUIDODINÂMICA E FREQUÊNCIA CENTRAL.....	34
5.2 ANÁLISE DE SINAIS DE PRESSÃO .....	35
5.3 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO R <sup>2</sup> .....	40
5.4 PERFIS DE TEMPERATURA .....	43
5.5 FORÇA DE SECAGEM .....	47
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>51</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	51
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de fluidização gás-sólido tem sido amplamente estudada e aplicada na indústria para processos de secagem de grão e pastas. Essa configuração de equipamento também é alvo de pesquisa e investimento no ramo farmacêutico, principalmente na fabricação de pós micro/nanoparticulados e também no recobrimento de partículas.

Partículas finas possuem grande característica aglomerativa, devido à ação de forças de Van der Waals e a alta exposição de superfície de contato (MUJUMDAR, 2006; GELDART, 1973). Essa tendência de formação de aglomerados é indesejável devido à redução da superfície de contato fluido-partícula que compromete e diminui as taxas de transferência de calor e massa do sistema que, como um todo, configura um sistema de fluidização de baixa qualidade e que pode levar o leito ao colapso.

Estudos são desenvolvidos na área com intuito de entender e melhorar o sistema de fluidização para os mais diferentes tipos de partículas. Exemplos desses estudos incluem a pré-mistura de partículas metálicas com ação de campo magnético oscilatório (YU et al., 2005), aplicação de equipamentos geradores de ondas ultrassônicas e vibração acústica (DING et al., 2008), aplicação de vibração mecânica no leito, que atua reduzindo a magnitude dos aglomerados e melhorando a fluidização (MEILI, 2009).

Um outro destaque que vem ganhando espaço na literatura nos últimos anos é o leito fluidizado pulsado. A técnica consiste na aplicação de pulsos de fluido ascendente na base de entrada do leito por meio da utilização de uma válvula, não sendo necessária a utilização de misturas de outros materiais particulados ou a adaptação de outros equipamentos e dispositivos na parte exterior ao leito como ocorre nos exemplos citados anteriormente. De forma geral, os resultados obtidos quando a pulsação de fluxo de entrada de fluido é utilizada mostrou-se muito positiva, tendo como característica a desaglomeração do material particulado e redução da velocidade de mínima fluidização quando comparados com leito fluidizado convencional (ALI et. al, 2012; ALI et. al, 2016; IRELAND, 2016).

Outra vertente de pesquisa dentro do ramo de estudo da fluidização de partículas é a utilização de sinais de pressão para entender o comportamento do sistema e suas

particularidades. A técnica de medidas de flutuação de pressão, associada ou não ao processo de secagem de pasta e atmosfera úmida, já é consolidada na literatura e vem ganhando espaço nos últimos anos devido as suas vantagens de fácil aplicabilidade. Essa técnica destaca-se por não ser uma técnica invasiva e não apresenta a necessidade de equipamentos e plataformas físicas complexas que possam a vir a sofrer limitações de ampliação para a esfera industrial.

Exemplos da aplicação da técnica de flutuação de pressão, em atmosfera seca, podem ser citados a seguir: Parise et al. (2013) que analisou a região de mínima fluidização do leito através da técnica da análise espectral Gaussiana, técnica essa também empregada nesse presente trabalho, e He et al. (2014) que também fez uso das medidas de flutuação de pressão para partículas não esféricas, com o intuito de compreender melhor o momento da transição entre os regimes borbulhante e turbulento.

Já quando o tema abordado é recobrimento de partícula em atmosfera úmida, alguns trabalhos são mencionados a seguir: Parise et al (2011) aplicou a técnica para identificar a região de mínima fluidização por meio da frequência central média durante o processo de recobrimento de partículas de celulose microcristalina (CMC), (SILVA, 2015) utilizou métodos analíticos de inteligência artificial para estudo, monitoramento e controle do processo de recobrimento de partículas e Schaffka (2017) utilizou a análise espectral Gaussiana, juntamente com o estudo de perfis de temperatura e umidade para diferentes condições de ensaio, afim de identificar a região de defluidização do leito para partículas esféricas de vidro e alumínio pertencentes ao grupo D de Geldart.

Evitar aglomeração e colapso do regime de fluidização em um reator é de extremo interesse, já que o colapso do sistema prejudica de forma significativa a eficiência de qualquer processo em leito fluidizado seja ele uma reação química ou uma operação unitária. A prevenção desse fenômeno indesejável requer um estudo mais aprofundado e um melhor entendimento do comportamento do sistema.

Tendo como base o exposto acima, o emprego de um sistema fluidizado gás-sólido associado a técnica de medidas de flutuação de pressão é eficiente para identificar a região de colapso do sistema? O emprego deste tipo de equipamento

impacta de forma positiva o processo de secagem de pastas? A união dos métodos de medidas de flutuação de pressão e secagem de pasta em leito fluidizado é efetiva?

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é expandir o estudo sobre o comportamento fluidodinâmico do processo de secagem de pasta em leito fluidizado gás-sólido utilizando medidas de flutuação de pressão em atmosfera úmida.

Os objetivos específicos para o desenvolvimento desse projeto serão:

- Realizar o processo de secagem de pasta em leito fluidizado utilizando partículas de tamanho 925  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio;
- Aplicar a técnica de medidas de flutuação de pressão para a análise do processo de secagem e recobrimento de partículas;
- Aplicar a técnica de medidas de flutuação de pressão para tentar identificar a região de colapso e a defluidização do sistema gás-sólido durante a operação de secagem de pasta.
- Comparar os resultados obtidos com trabalhos já publicados na literatura.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO

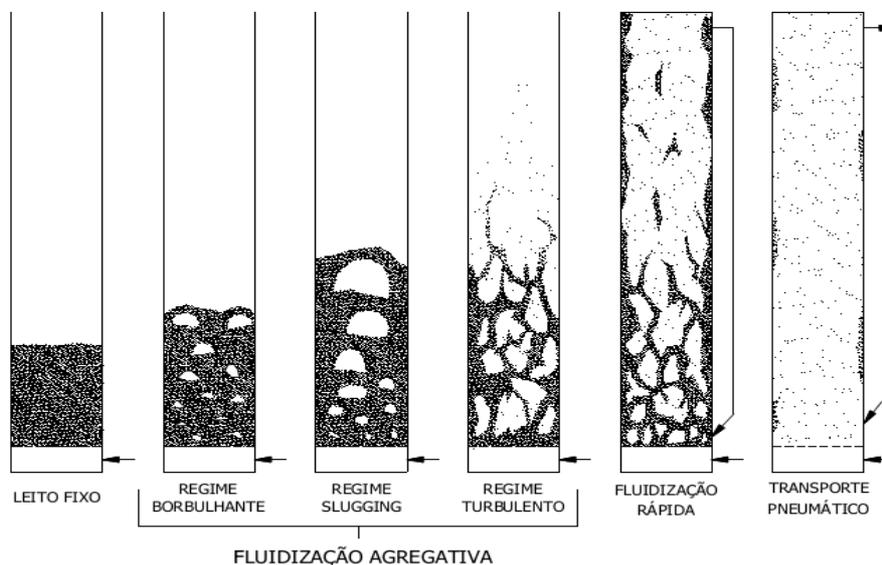
A fluidização consiste na passagem vertical de um fluido ascendente através de um leito no qual estão depositadas partículas sólidas. Nessa operação, dependendo da velocidade superficial desse fluido, as partículas adquirem um comportamento muito semelhantes a um líquido em ebulição (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Esse modelo de contato fluido-partícula proporciona boa mistura dos componentes no leito, que por sua vez adquirem altas taxas de transferência de calor e de massa tornando essa configuração de mistura muito desejada (MUJUMDAR, 2006).

Industrialmente, leitos fluidizados são aplicados em diversas áreas, dentre elas pode-se citar a indústria farmacêutica, a petroquímica, alimentos, bebidas, tratamento de efluentes, materiais cerâmicos, entre outras. Sua vasta versatilidade faz com que esse equipamento atue dentro dos mais diversos modelos, configurando desde excelentes biorreatores no tratamento de efluentes até torres de adsorção de amônia e hidrodessulfurização na indústria química (MUJUMDAR, 2006).

##### 3.1.1 Regimes de Fluidização

Os regimes de fluidização gás-sólido (Figura 1) são caracterizados em leito fixo, leito borbulhante, *slugging*, regime turbulento e transporte pneumático. Esses regimes são observados com base no tipo e dimensão da partícula juntamente com a velocidade superficial de vazão do fluido que alimenta o sistema (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; MUJUMDAR, 2006).

Figura 1: Regimes de fluidização



Fonte: Adaptado de Grace *et al.* (1997)

- Leito Fixo: quando um fluido transpassa verticalmente um leito alimentado com partículas sólidas com baixa vazão de fluido, onde o fluido apenas percola os espaços vazios não ocupados pelas partículas sem exercer uma influência significativa no sistema, têm-se caracterizado o leito fixo. Nesse regime de fluidização, as partículas encontram-se estacionárias;
- Fluidização incipiente (Mínima fluidização): com o aumento da vazão do fluido que transpassa axialmente o leito, atinge-se o estado onde a velocidade superficial do gás (ou líquido) é suficiente para contrabalançar o peso das partículas e a queda de pressão do leito torna-se igual ao peso das partículas por área de seção transversal;
- Leito borbulhante (Fluidização Agregativa): a partir do ponto de mínima fluidização, para sistemas gás-sólido com partículas um pouco mais densas, observa-se uma agitação vigorosa do material particulado no leito e formação de bolhas no sistema. O leito não se expande muito mais do que já observado no ponto de mínima fluidização.
- *Slugging*: após o regime de leito borbulhante no sentido do crescimento da vazão do fluido, as bolhas começam a aumentar de tamanho conforme as mesmas ascendem verticalmente dentro leito, partindo de tamanhos

menores e crescendo até o ponto onde atingem diâmetros de dimensão próxima a do diâmetro do leito;

- Regime turbulento: quando a velocidade superficial do fluido é alta o suficiente para exceder a velocidade de transporte das partículas fazendo com que a superfície superior do leito desapareça, e ao invés de bolhas o leito apresenta movimentação irregular e violenta das partículas com vários tamanhos e formas de espaços vazios ao longo do sistema, tem-se o sistema de fluidização turbulento. Nesse estágio é comum ocorrer o arraste das partículas de dimensões menores para fora do leito.
- Transporte pneumático (*lean-phase*): caracterizado pelo arraste das partículas para fora do leito fluidizado. Nesse regime, a velocidade superficial do fluido atinge valores maiores do que a velocidade de transporte das partículas, e em consequência estas são todas arrastadas. Quando há a coleta e a reinserção dessas partículas no leito, o sistema passa a ser um leito de fluidização rápida ou leito fluidizado circulante.

### 3.1.2 Caracterização Das Partículas

Geldart (1973) classificou as partículas sólidas em quatro grupos (C, A, B e D) de acordo com seu comportamento fluidodinâmico, como descrito a seguir:

Grupo C: o grupo C de Geldart é composto por partículas muito finas, geralmente menos do que 30  $\mu\text{m}$ . Devido à grande área superficial exposta, essas partículas sofrem grande influência das forças aglomerativas de Van der Waals que acaba tornando esse grupo extremamente coesivo, potenciando a formação de canais preferenciais que comprometem o regime de fluidização. Exemplificando esse grupo temos os fármacos nanoparticulados, a farinha de trigo e o cimento;

Grupo A: as partículas sólidas classificadas neste grupo têm diâmetro médio entre 30 e 100  $\mu\text{m}$ . Essas partículas são fáceis de fluidizar quando secas e tem por característica um expansão homogênea do leito quando atingem a velocidade de mínima fluidização. Não há formação imediata de bolhas após a mínima fluidização, o que só ocorrerá até que as mesmas atinjam uma velocidade superficial superior e suficientemente alta para propiciar este comportamento. Tal velocidade chama-se velocidade de borbulhamento mínimo ( $U_{mb}$ ). Como exemplo pode-se citar o leite em

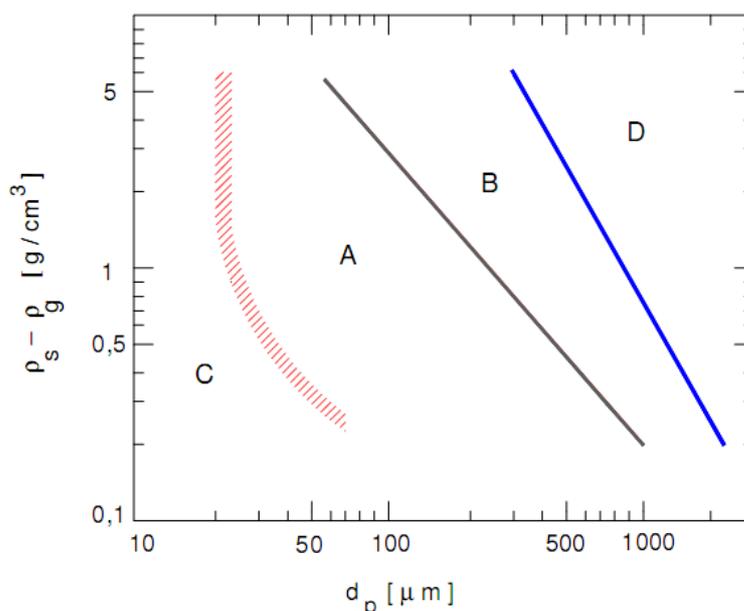
pó e as partículas que operam um reator *FCC (fluid catalytic cracking)* na indústria do petróleo;

Grupo B: partículas que possuem diâmetro médio em uma faixa entre 100 e 1000  $\mu\text{m}$ . Apresentam comportamento semelhante a partículas de areia e são também muito fáceis de atingir a fluidização. A partir do ponto de mínima fluidização há formação imediata de bolhas e as velocidades de mínima fluidização e borbulhamento mínimo, para este grupo, são iguais ( $U_{mf} = U_{mb}$ ). O exemplo mais comum desse grupo de partícula é a areia de sílica.

Grupo D: neste grupo estão presentes as partículas com diâmetro médio maior que 1000  $\mu\text{m}$ . Essas partículas apresentam comportamento semelhante a do grupo C após atingir a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf} = U_{mb}$ ), porém devido às partículas possuírem grande dimensão e alta densidade, o regime de fluidização não é alcançado facilmente, devido à formação de bolhas de diâmetro muito elevado no leito. Como exemplos é possível citar os grãos em geral, como o café, milho e a soja.

Esta classificação de Geldart (1973) é ilustrada no Gráfico 1.

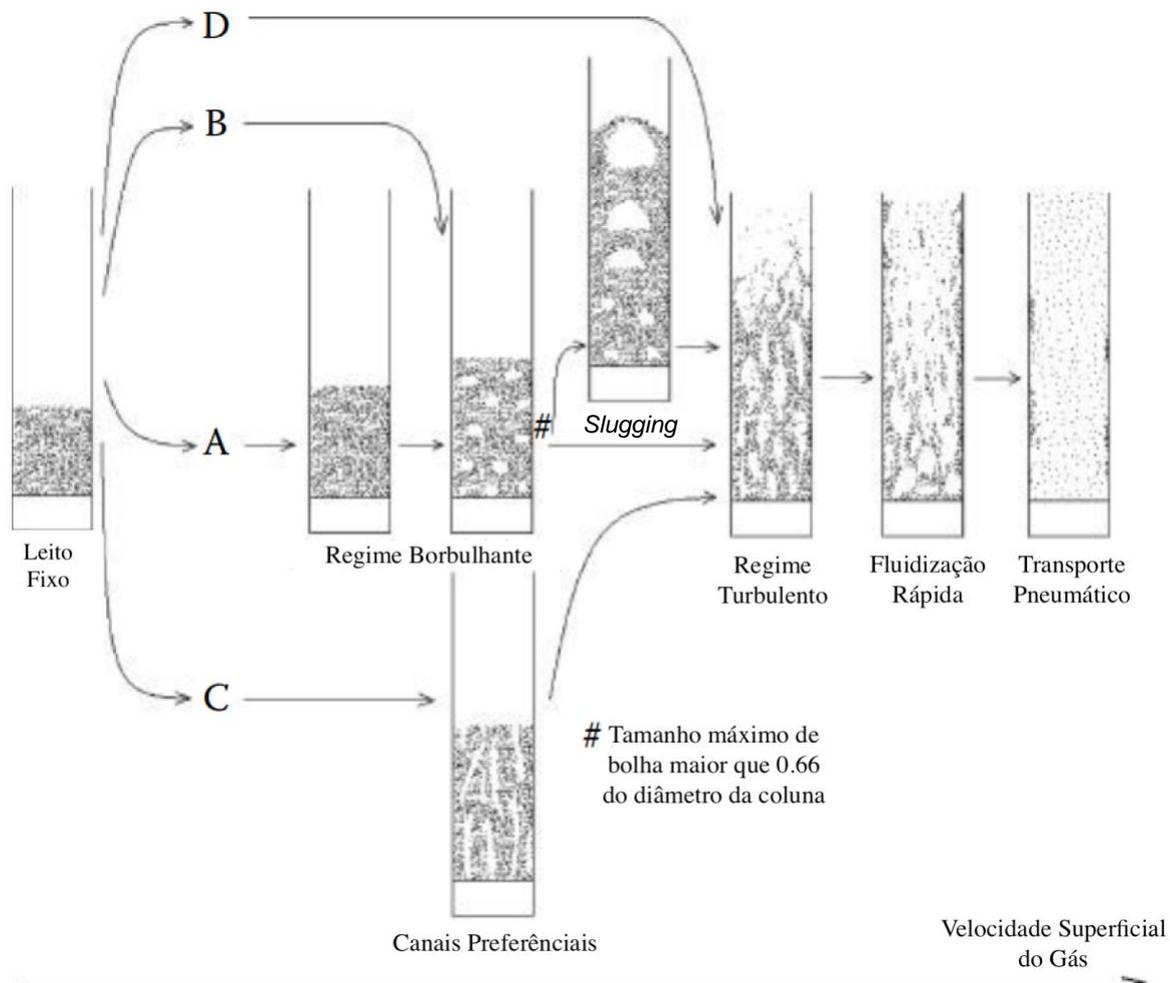
**Gráfico 1: Classificação de Geldart (1973) de partículas fluidizadas com ar em condições ambiente**



Fonte: adaptada de Kunii e Levenspiel (1991)

De maneira geral e de acordo com a classificação e características da partícula, os regimes fluidodinâmicos observados estão dispostos na Figura 2 .

**Figura 2: Regimes de fluidização de acordo com a classificação de partículas sólidas de Geldart.**



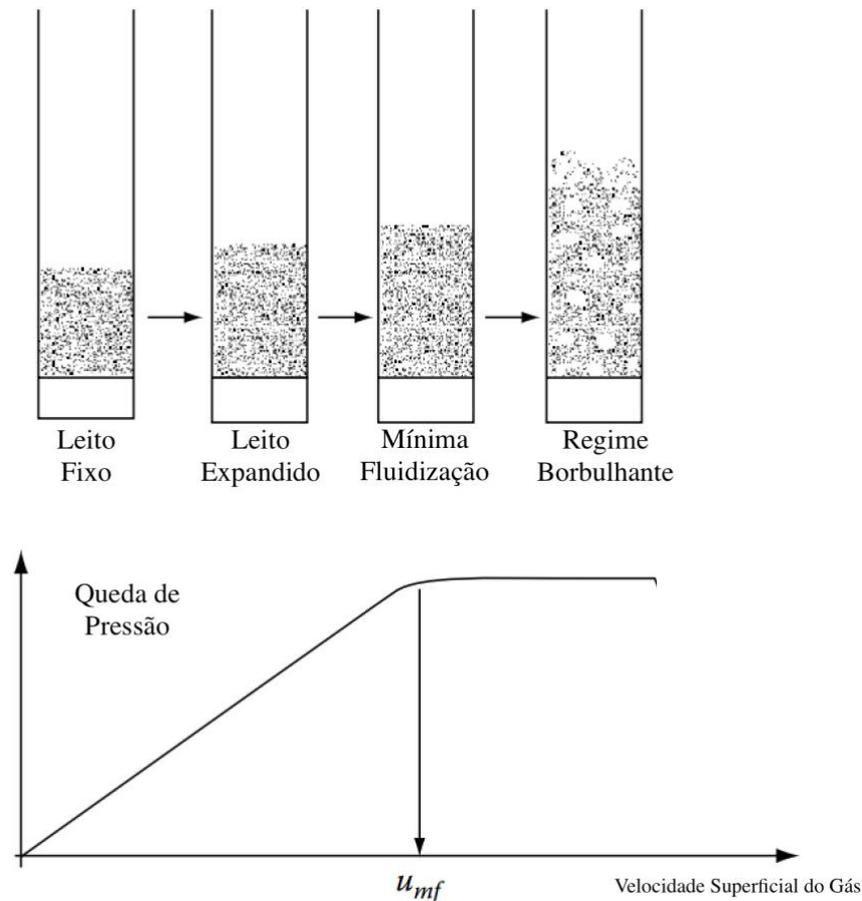
Fonte: adaptada de Mujumdar (2006).

### 3.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização

Outro parâmetro importante a se determinar em leitos fluidizados é a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), que pode ser obtida por meio da curva fluidodinâmica ou a partir de correlações da literatura.

A Figura 3 apresenta um esquema da curva fluidodinâmica, que se refere à curva da queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do gás.

**Figura 3: Curva fluidodinâmica para determinação da velocidade de mínima fluidização**



Fonte: adaptada de Mujumdar (2006).

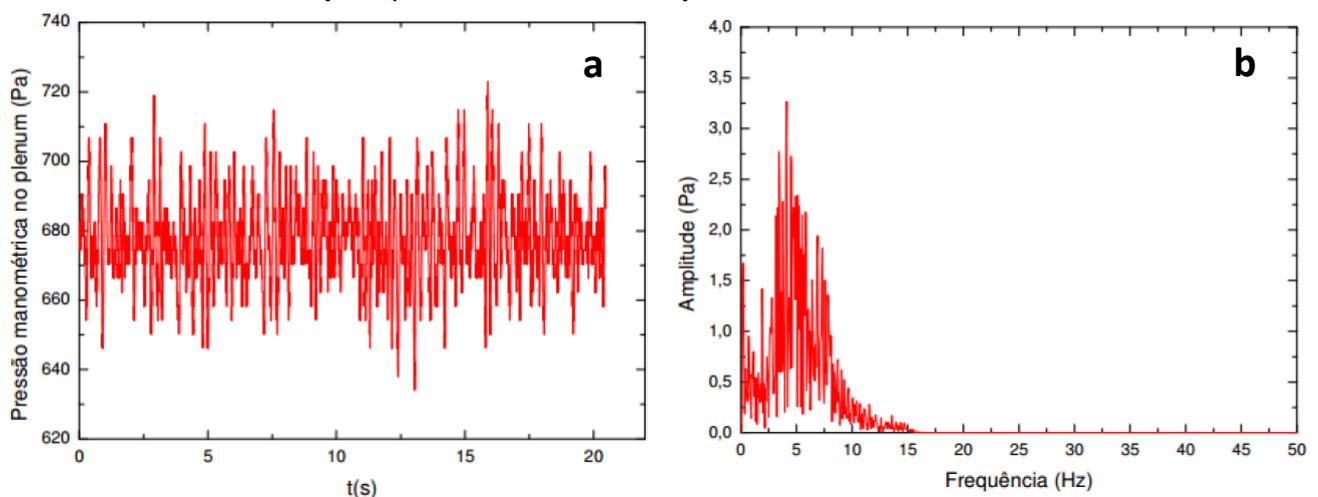
A curva fluidodinâmica possui um comportamento característico e reprodutivo, amplamente utilizada para a determinação de velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). Na Figura 3, pode-se ver uma relação do comportamento da curva com o regime de fluidização o qual o leito se encontra. No leito fixo, como o aumento da vazão há uma dependência linear da queda de pressão no leito com a velocidade superficial do fluido, até o momento em que a velocidade de mínima fluidização é atingida. A partir desse ponto, as partículas que estavam depositadas sobre o leito entram em movimento e queda de pressão passa a ser constante ao longo do sistema. Quando a velocidade de arraste da partícula é atingida, após o regime de leito borbulhante, há um decréscimo abrupto na queda de pressão seguida de um leve crescimento. A partir desse ponto as partículas entram no sistema de transporte pneumático.

### 3.2 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO

Uma maneira de estudar o comportamento de leitos fluidizados gás-sólido é por meio da aplicação da análise de medidas de flutuação de pressão. A técnica consiste na tomada de sinais de pressão no leito por meio de um transdutor de pressão de resposta rápida. A aquisição dos sinais é feita a uma frequência de 400 Hz. A técnica é bastante utilizada devido à facilidade, de ser não intrusiva. Além disso, essa técnica possui a vantagem de permitir a captação de sinais sob efeitos de fenômenos dinâmicos que ocorrem dentro do leito, tais como formação e rompimento de bolhas de gás e turbulência de escoamento (SCHOUTEN; BLEEK, 1998).

Parise et al. (2013) desenvolveu e aplicou a técnica de análise de flutuação de pressão associada a curva espectral gaussiana para determinar a região de defluidização do leito. Em seus estudos, foram coletadas medidas de pressão no *plenum* utilizando um transdutor de pressão de resposta rápida. As medidas de pressão coletadas em função do tempo geram um espectro como o mostrado no Gráfico 3a. Esses dados foram normalizados para aplicação da transformada rápida de Fourier que gera a relação da amplitude do sinal de pressão em função do novo domínio que foi alterado de tempo para frequência (Gráfico 3b).

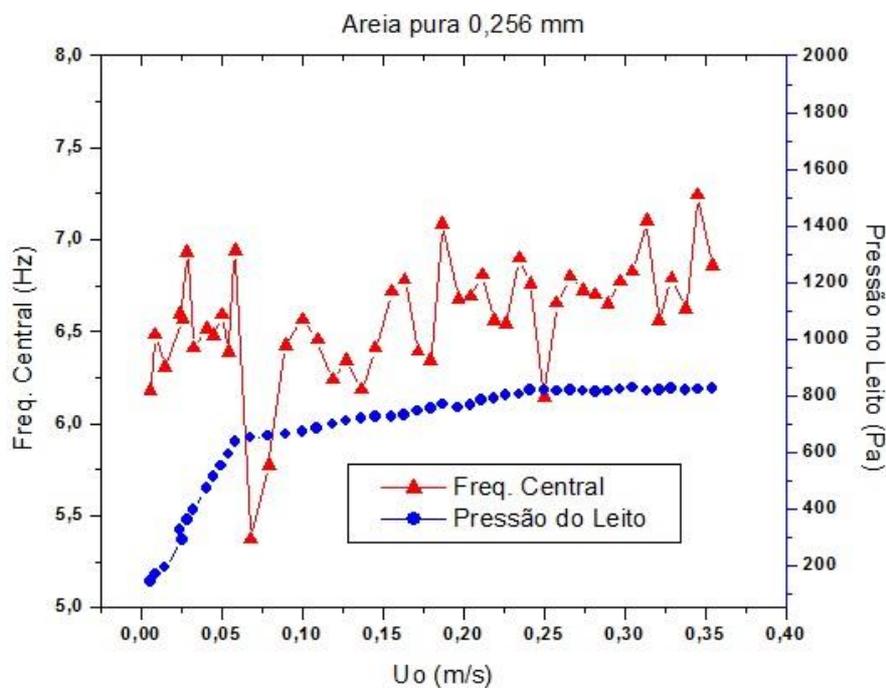
**Gráfico 3: a) Dados de sinal de pressão (Pa) em função do tempo t(s). b) Amplitude do sinal de pressão em função da frequência em Hertz gerado após a aplicação da transformada rápida de Fourier.**



Fonte: Parise et al. (2013)

Os dados de sinal de pressão gerados pela aplicação da transformada são ajustados à curva Gaussiana para enfim determinar-se os valores da frequência central e do desvio padrão do espectro obtido experimentalmente. Os dados de frequência central são plotados em função da velocidade superficial do fluido ( $U_0$ ) juntamente com a curva fluidodinâmica permitindo assim a determinação da região de defluidização do sistema (Gráfico 4).

**Gráfico 4: Aplicação do método da análise de frequência central no comportamento fluidodinâmico de uma mistura binária de areia e serragem (Região de defluidização entre 0,06 e 0,09 m/s)**



Fonte: Coelho, H.K. (2015)

O método de análise espectral Gaussiana pode ser aplicado em diversos tipos de sistemas nas mais diferentes áreas, esse método também foi aplicado para estudo da fluidização de misturas binárias (biomassa-partícula inerte), em recobrimento e granulação de partículas, e na secagem de pasta em leito fluidizado, além da aplicação tradicional no estudo da fluidização de partículas em sistema gás-sólido.

Outro exemplo de aplicação de medidas de flutuação em leito fluidizado pode ser visto em Gómez-Hernández et al. (2015), no qual a técnica foi utilizada no domínio da frequência em função da distribuição de energia cumulativa para detecção de

aglomeração de material particulado durante um processo de gaseificação específico em leito fluidizado utilizando 10 mil pontos de pressão para cada medida efetuada.

Pesquisas recentes utilizando medidas de flutuação de pressão podem ser observadas com frequência na literatura nos últimos anos. A técnica foi utilizada por Dong *et al.* (2016) no estudo do efeito de um leito vibrofluidizado pulsado utilizado para a separação de partículas finas de carvão. Nesse estudo, a técnica de medidas de flutuação de pressão foi aplicada na investigação da distribuição de densidade ao longo das camadas de material sólido disposto no leito para 25 pontos de medidas sob vibração.

### 3.3 SECAGEM DE PASTA

Segundo Strumillo *et al.* (1983), materiais pastosos podem ser classificados em duros (precipitados e tortas de filtração), fofos (polpas em geral), emulsões (leite e maionese), suspensões (leite de cal e enxofre em água) e soluções (sangue e salmoras).

De acordo com Weltman (1992), na reologia, pasta é definida como sistema sólido-líquido composto de micropartículas ou coloides dispersos em suspensão em uma fase líquida. É possível citar como exemplos desse sistema, o leite, a clara de ovo, maionese, carbonato de cálcio em água, sangue e outros (MEILI, 2009).

Leitos fluidizados são extensamente utilizados no processo de secagem de grão e materiais particulados na indústria (MUJUMDAR, 2006). Esses equipamentos também atuam na secagem de pastas e misturas suspensas com material particulado associadas a materiais inertes. O processo de secagem em leito fluidizado possui extensa aplicação no processamento de muitos produtos químicos, carboidratos, biomateriais, fármacos, pesticidas, agrotóxicos, fertilizantes, resinas e etc. podendo também ser utilizado na fabricação de produtos para calcinação, combustão, incineração, tratamento de resíduos e processos de proteção ambiental. Para a secagem de materiais particulados entre 50 – 2000  $\mu\text{m}$ , a secagem em leito fluidizado compete com muito sucesso com outros equipamentos de secagem tradicionais (MUJUMDAR, 2006).

No processo de secagem, o leito opera geralmente com relação de  $U_0/U_{mf}$  de 2 a 4. Materiais com alto teor de umidade tendem a ter maiores velocidades de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) quando comparadas com as mesmas partículas em estado seco, esse comportamento é decorrente da dominância de forças coesivas exercidas pela superfície úmida das partículas. No estágio inicial da secagem de partículas úmidas em leito fluidizado é recorrente que somente a camada superior de partículas no leito fluidize deixando as camadas inferiores estacionárias (MUJUMDAR, 2006).

Tratada como “arte” por Meili (2009), a secagem de pastas é uma operação de extrema complexidade, devido ao grande número de pastas existentes e suas diversas características que impactam de formas diferentes no processo de secagem, isso faz com que seja necessário um estudo diferente para cada pasta, afim de se determinar o método mais adequado para sua secagem (FREIRE, 1992; MEILI, 2009).

O processo de secagem de pasta em leito fluidizado foi desenvolvido na antiga União Soviética na década de 50 e foi aplicada na secagem e confecção de materiais biológicos finos, pigmentos em geral, produtos farmacêuticos, entre outros. O processo de secagem de pastas e as características do produto final obtido pelo processo é fruto principalmente das propriedades reológicas do material pastoso e de sua resistência térmica podendo gerar materiais particulados dos mais diversos formatos e tamanhos (desde partículas menores que  $10\ \mu\text{m}$  até partículas com 5 mm) (MEILI, 2009).

A secagem de material pastoso em leito fluidizado é geralmente operada e assistida com o uso de um material particulado inerte. Esse material pode ser esferas de vidro, esferas metálicas, areia de sílica, entre outros (REGER et al., 1967; MEILI, 2009).

A pasta adere-se à partícula inerte formando uma fina película em sua superfície. O princípio do processo de secagem consiste basicamente na desidratação da pasta na superfície do material particulado inerte e na renovação da película pastosa envolta na superfície desse material. A película pastosa do material é renovada no processo de secagem devido ao movimento das partículas no leito, que ao colidirem quebram a película seca envolta na partícula produzindo um pó fino

e seco, que é posteriormente arrastado pela corrente ascendente do fluido quente que alimenta o leito (REGGER et al., 1967; MEILI, 2009).

Baseado nesse princípio, o processo divide-se em duas etapas. Na primeira etapa, o processo é limitado pela cinética de secagem e pelo processo de evaporação da água na superfície inerte. Já na segunda etapa, a abrasão da película pastosa sobre a partícula é determinante no processo. Estudos mostram que, se a fase limitante do processo for a fase de abrasão da película pastosa sobre o material particulado inerte, o processo torna-se inviável, pois haverá um acúmulo de material pastoso sobre o material inerte fazendo com que o leito entre em colapso e o processo de fluidização cesse. O sistema entra em regime permanente quando a taxa de recobrimento das partículas inertes é igual a taxa de remoção da película seca promovida pela colisão das partículas no sistema (MEILI, 2009).

A secagem em si é um processo complexo que envolve simultaneamente os fenômenos de transferência de massa e calor e basicamente consiste na retirada de água pelo processo da vaporização e arraste da mesma para o exterior da superfície sólida. Esse processo geralmente é realizado por meio do contato com um gás aquecido que transpassa o material úmido (KEEY, 1992; PARISE et al., 2007). O objetivo do processo de secagem na indústria consiste basicamente na redução de volume de material com intuito de diminuir custos com transporte. E também pode ser aplicada com objetivo de inibir atividade microbiológica para garantir a preservação do produto de interesse e a estabilidade físico-química do material durante a estocagem (MEILI, 2009).

Nos trabalhos de Silva et al. (2011) e Silva (2015) foi estudado o fenômeno de defluidização em atmosfera úmida durante o recobrimento de partículas de CMC. Em seu estudo Silva et al. (2011) utilizou da técnica de análise espectral Gaussiana como método de monitoramento e controle do processo de recobrimento de partículas de celulose microcristalina de 325  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio. No presente trabalho foi utilizado um controlador de vazão de fluxo de ar tipo PI (Proporcional e Integral) para garantir o bom regime de fluidização. A faixa de frequência adotada como *setpoint* foi de 6,0 a 7,0 Hz e a temperatura de secagem foi mantida a 70°C.

Continuando seus trabalhos, Silva (2015) utilizou de técnicas e métodos analíticos associados a tecnologia de inteligência artificial (Lógica *Fuzzy*) com intuito

de desenvolver novos sistemas de monitoramento e aprimorar o controle do processo de recobrimento. Foram abordados e analisados os perfis de temperatura, umidade relativa e eficiência de evaporação, além da avaliação fluidodinâmica utilizando do método da análise espectral Gaussiana que foram base de aplicação para o desenvolvimento desses novos sistemas de controle.

Em um recente trabalho realizado por Schaffka (2017), a análise da secagem de pasta utilizando medidas de flutuação foi aprofundada. Utilizando partículas esféricas de vidro e metal ambas de 1,55 mm de diâmetro e solução de carbonato de cálcio, a autora estudou o fenômeno de defluidização em concentrações de 9 e 15% variando a vazão de atomização de pasta entre 11, 13 e 15 mL/min. Em seus experimentos, os dados de pressão foram coletados no *plenum*, foram testadas a temperatura de 85°C como temperatura de secagem e com relação de  $U_o/ U_{mf}$ .

Em seus estudos, Schaffka (2017) conclui que a análise espectral Gaussiana não foi efetiva na determinação da região de defluidização nas condições propostas quando se utiliza partículas do grupo D de Geldart. A autora também discute o comportamento dos perfis de temperatura do leito e do ar além dos perfis de umidade, força e eficiência de secagem concluindo com o cálculo e análise do coeficiente volumétrico de transferência de calor.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se explanados a descrição do sistema experimental que será utilizado, a metodologia que será utilizada para determinar a região de defluidização do leito, o procedimento de aquisição e tratamento dos dados obtidos e também a relação dos materiais utilizados juntamente com suas características físicas.

### 4.1 MATERIAIS

Nos materiais escolhidos para a elaboração do projeto estão presentes esferas de vidro como o material inerte que preencherá o leito e a pasta utilizada para o processo de secagem foi uma suspensão aquosa de carbonato de cálcio.

As características físicas do material particulado sólido determinadas são o diâmetro médio, a esfericidade e densidade aparente das esferas de vidro. A análise granulométrica das partículas foi realizada por meio de peneiramento utilizando peneiras padronizadas de Tyler. A densidade aparente foi obtida por meio do deslocamento de líquido ocasionado pela adição de partículas sólidas (picnometria líquida) e a esfericidade será definida pelo método que relaciona o maior diâmetro inscrito dividido pelo menor diâmetro circunscrito.

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Muitas padronizações de peneiras são utilizadas na caracterização física de partículas sólidas. As mais conhecidas dessas padronizações são as peneiras de Tyler e ASTM, as peneiras utilizadas neste trabalho foram as de Tyler. Também foram utilizadas como método de caracterização a densidade aparente das partículas e sua esfericidade.

#### 4.1.1 Diâmetro Médio de Sauter

Para determinar o diâmetro médio de Sauter do material particulado utiliza-se a equação (3) a seguir.

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (3)$$

Onde,

$x_i$  é a fração mássica de partículas em cada peneira, e este valor é obtido pela divisão entre a massa retida em cada peneira pela massa total de partículas peneiradas.

$d_{ps}$  é o diâmetro médio de Sauter (mm);

$d_i$  é a abertura da peneira (mm).

#### 4.1.2 Densidade Aparente

Para determinação da densidade aparente das esferas de vidro utilizadas no experimento foi utilizado método de picnometria a líquido, que consiste na relação entre a massa de material pelo volume de líquido deslocado quando o material é submerso no mesmo. Para determinação da densidade aparente do material particulado nesse trabalho foi utilizada água destilada.

#### 4.1.3 Esfericidade

Para a determinação da esfericidade das partículas foi utilizado o método estabelecido por Peçanha e Massarani (1986) no qual é determinado pela relação entre o diâmetro inscrito e diâmetro circunscrito de uma partícula. No Quadro 1 a seguir têm-se os valores encontrados correspondentes a caracterização do material particulado.

**Quadro 1. Caracterização do material particulado**

Esferas de Vidro	
Diâmetro médio ( $d_p$ )	925 $\mu\text{m}$
Densidade Aparente	2450 $\text{kg/m}^3$
Esfericidade ( $\phi_p$ )	0,94 $\pm$ 0,05

Fonte: Autoria Própria (2018)

## 4.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

O sistema utilizado (Figura 5) é composto por uma coluna de policarbonato cristal de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. O ar atmosférico é utilizado como agente fluidizante e é inserido no sistema por meio de um soprador radial da marca Elan®, modelo CRE04, que está acoplado a um motor de 4 cv. O soprador se encontra conectado ao leito por meio de uma tubulação de aço comercial de 0,038 m de diâmetro interno. A rotação do motor do soprador é regulada com o emprego de um inversor de frequência da marca WEG®, modelo CFW080160T2024POA1Z. A vazão mássica do ar atmosférico que alimenta o leito de partículas é determinada com o uso de placa de orifício (construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT, 1994). Para tanto, a pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício são obtidas através de transdutores de pressão (Cole Parmer®, modelo 98073-14, de 0 a 12442 Pa, e do modelo 68071-14, de 0 a 6227 Pa, respectivamente). O aquecimento do ar fluidizante é realizado por meio de resistências elétricas e um regulador/controlador tipo PID (NOVUS®, modelo N1100) é utilizado para controlar a temperatura do ar no plenum. Os sinais de pressão oriundos do *plenum* são captados utilizando um transdutor diferencial de pressão (Cole Parmer®, modelo 68071-14, com faixa de 0 a 6227 Pa). Todos os transdutores de pressão serão conectados a um sistema de aquisição de dados (National Instruments™, modelo NI USB 6211). Neste trabalho serão utilizados dois sensores: um de umidade relativa do ar na entrada e o outro de temperatura de bulbo seco (marca: Novus®, modelos: RHT-XS e N322 RHT, respectivamente). Para efetuar as medidas de temperatura na coluna, termopares tipo T são utilizados e conectados a indicadores de temperatura da marca Novus®. Os sinais de pressão do leito, temperatura e umidade são visualizados e processados a partir de um microcomputador com *software* LabView™ versão 10.0. São coletados 2048 pontos de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz. Um bico atomizador do tipo duplo fluido (Spraying Systems®, SU11-SS) atomiza a suspensão diluída provinda de uma bomba peristáltica (Vallair®, modelo SVP4H2B1SZAA). O compressor do tipo pistão (Schulz®, modelo 821410, 2 cv), fornece o ar para a atomização, o qual passa por um regulador de pressão (Fluir®, modelo AW200002U).

Um ciclone *Swift* conectado a um filtro de mangas tipo jato pulsante (Multiman®), realiza a coleta de pó seco.

**Figura 5: Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: bomba peristáltica; 3: transdutor de pressão; 4: ciclone; 5: filtro de mangas.**



**Fonte: Aatoria Própria (2018)**

#### 4.3 ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

Parise (2007) desenvolveu a análise espectral Gaussiana, que consiste na técnica de identificação da região de defluidização do leito no momento em que ocorre a transição do regime de fluidização. Para aplicação dessa metodologia, coletam-se 2048 pontos de pressão manométrica no *plenum* do leito a uma frequência de amostragem de 400 Hz (Gráfico 3a). Os sinais obtidos passam por um filtro digital IRR (resposta de impulso infinito do tipo baixa com topologia *Butterworth* e frequência de corte de 20 Hz). Posteriormente, os sinais de pressão são centralizados na média para aplicação da Transformada Rápida de Fourier. Este produz um espectro de pressão como mostrado anteriormente no Gráfico 3b. Em seguida, aplica-se o

logaritmo natural na amplitude desse espectro, e é realizado um ajuste numérico (métodos dos mínimos quadrados) que é dado pela equação (4) a seguir.

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} \{\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]\}^2 \quad (4)$$

Onde,

$A_e(f_k)$  é a amplitude espectral obtida da aplicação da Transformada Rápida de Fourier;

$G(f_k)$  representa a distribuição exponencial Gaussiana:  $G(f_k) = A_e \frac{-(f_k - f_c)}{2\sigma^2}$ ;

$e_k$  é o resíduo deixado pelo ajuste de curva;

$f_k$  e  $f_c$  são respectivamente os valores de frequência do sinal e frequência média (frequência central) da distribuição Gaussiana;

$\sigma$  é o desvio padrão da distribuição espectral;

$N = 2048$

$k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ .

Da equação (4) tem-se o valor de frequência central ( $f_c$ ) que será plotado juntamente com curva fluidodinâmica do sistema para assim determinar a região de defluidização do sistema.

#### 4.4 ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para a obtenção dos resultados do procedimento de secagem foram utilizadas esferas de vidro de 625  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio, relação  $h_L/D_{\text{int}} = 1,0$  e  $u_o/u_{mf} = 1,4$  e temperatura do plenum de 85°C. Com base nesses parâmetros foram definidos 4 ensaios como mostra o Quadro 2.

**Quadro 2. Organização e definição dos ensaios práticos**

<b>Ensaio</b>	<b>C<sub>susp</sub> (%)</b>	<b>Q<sub>susp</sub> (mL/min)</b>
<b>1</b>	15	11
<b>2</b>	15	15
<b>3</b>	9	11
<b>4</b>	9	15

Fonte: Aatoria Própria (2018)

#### 4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios, foi seguido o seguinte procedimento experimental :

- O material inerte foi inserido no leito;
- A carga das baterias alimentam o sistema de aquisição de dados e são compostas de duas baterias com 12 V cada e são conferidas antes de cada ensaio. O *software*, LabView™ versão 10.0, que é responsável pela geração dos dados do leito, é acionado após a verificação e ativação das baterias;
- O inversor de frequência é acionado para manter a relação de  $u_o/u_{mf}=1,4$ ;
- Neste instante, inicia-se o aquecimento do ar de secagem. Após atingir a temperatura de secagem, o ar quente fica circulando no sistema por aproximadamente 20 minutos, para o aquecimento do material inerte;
- Após esse procedimento, a bomba peristáltica e o ar de atomização foram acionados.
- No momento em que a pasta começou a ser atomizada no leito, o sistema de aquisição de dados foi acionado e o ensaio de secagem foi iniciado. Os dados coletados no sistema foram: queda de pressão no leito, velocidade superficial do fluido, frequência do inversor, frequência central, pressão a montante (antes da

placa de orifício), queda de pressão na placa de orifício, temperatura no leito, temperatura do bulbo seco na saída do leito, umidade relativa do ar na entrada em saída do leito. Os dados serão arquivados continuamente em arquivos com extensão *.lvm*;

- Os dados foram analisados visualmente à medida que o equipamento plota os gráficos para assim verificar a sua coerência;
- Ao final dos experimentos os equipamentos serão devidamente desligados, o material particulado foi retirado do leito, lavado e armazenado.

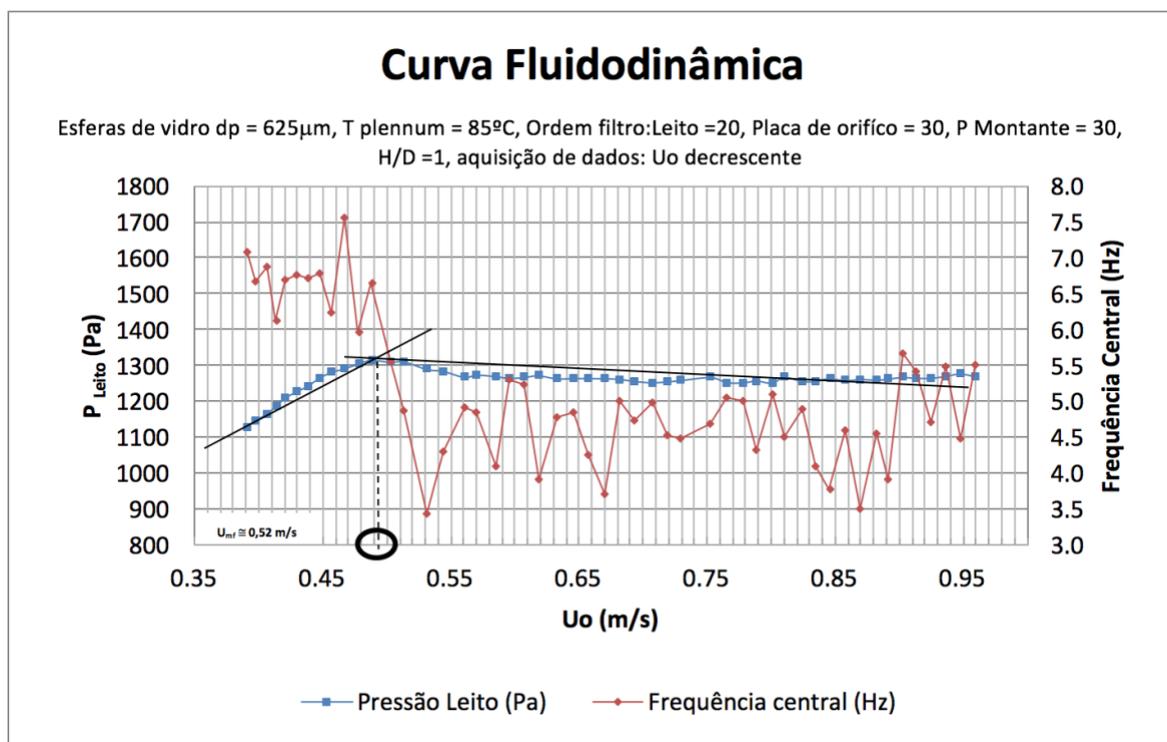
## 5 REULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse item serão abordados os resultados obtidos com os experimentos realizados e também todas as suas discussões pertinentes e relativas a cada condição estudada. São expressos nesse item a obtenção da curva fluidodinâmica, os resultados e análise dos sinais de pressão, o coeficiente de determinação  $R^2$ , os perfis de temperatura e força de secagem.

### 5.1 OBTENÇÃO DA CURVA FLUIDODINÂMICA E FREQUÊNCIA CENTRAL

O Gráfico 5 mostra as curvas fluidodinâmica e da frequência central. Condições experimentais: Esferas de vidro diâmetro  $925\mu\text{m}$ ,  $T_{\text{plenum}} = 85^\circ\text{C}$ , Ordem filtro: Leito = 20, Placa de orifício = 30, P Montante = 30,  $H/D = 1$ , aquisição de dados:  $U_0$  decrescente.

Gráfico 5 - Curvas fluidodinâmica e da frequência central.



Fonte: Autoria própria (2018)

Com base no gráfico anterior, foi encontrada uma velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) para a esfera de vidro de aproximadamente  $0,52 \text{ m/s}$ . A velocidade

utilizada para a realização dos experimentos foi definida considerando um valor 40% acima da  $U_{mf}$ , então a velocidade superficial do fluido ( $U_o$ ) utilizada nos ensaios experimentais foi 0,73 m/s.

## 5.2 ANÁLISE DE SINAIS DE PRESSÃO

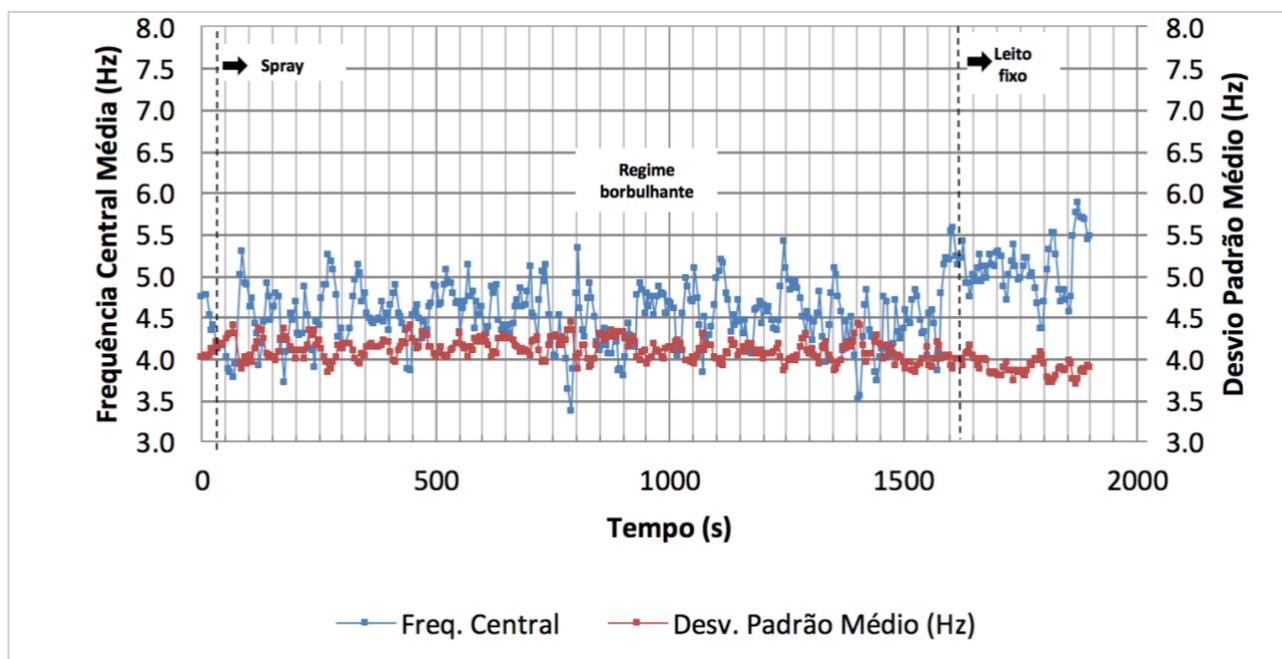
Os Gráficos 6a e 6b mostram a evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio em relação ao tempo de experimento para concentrações de suspensão diluída de 9% e 15% em massa, respectivamente, e uma vazão de atomização de 11 mL/min. Os experimentos foram iniciados em regime borbulhante respeitando a relação  $U_o/U_{mf}$  definida previamente com base nos experimentos realizados por Schaffka et al. (2017).

Enquanto o leito mantinha-se em regime borbulhante observou-se que os valores de frequência central média e desvio padrão médio mantinham-se oscilantes dentro de uma mesma faixa de valores. Para o gráfico 6a os valores mantiveram-se entre 3,5 e 5,5 Hz para a Frequência Central Média, e 3,5 e 4,5 Hz para o desvio padrão médio. Já para o gráfico 6b os valores de frequência enquadravam-se entre 4,5 a 5,5 Hz e o desvio padrão entre 5,0 e 6,0 Hz

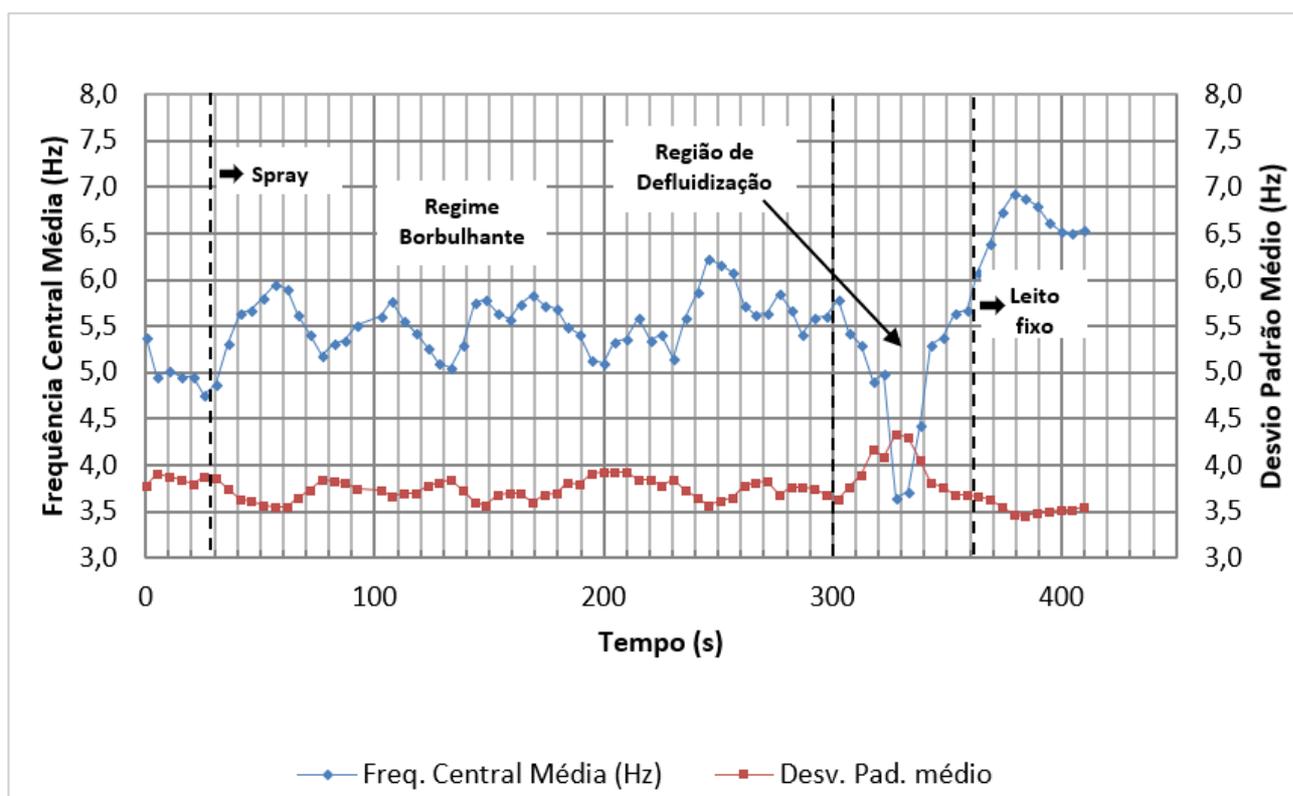
Com a evolução dos experimentos no tempo, as condições operacionais do sistema foram comprometidas, o leito apresentou instabilidade ao entrar na região de defluidização. Nessa região, os valores de frequência central média sofreram alteração do padrão de oscilação observado no regime borbulhante. Para o gráfico 6a a instabilidade do leito começou a ser visualmente aparente a partir dos 1600 s, momento no qual o leito apresentava regiões parcialmente defluidizadas e formação de canais preferenciais. Uma certa tendência de retomada do regime de fluidização foi observada para esse sistema em questão. O leito tendia ao colapso, porém conseguia retomar à fluidização poucos segundos depois, gerando assim a zona de instabilidade a partir de 1600s, momento o qual o sistema apresentou colapso total do regime de fluidização e assim a movimentação das partículas foi cessada completamente. A partir desse momento, a variação da frequência apresenta um pico a oscilação dos valores e passa a atingir valores próximos a 6,0 Hz. Os valores de desvio padrão médio para esse sistema não apresentaram variação acentuada aparente.

Já para o sistema apresentado no gráfico 6b o comportamento observado foi distinto. A variação dos valores de frequência central ficou entre 5,0 e 6,0 Hz até o sistema entrar na zona de defluidização. Nessa região houve um decréscimo acentuado no valor de frequência (próximo a 3,5 Hz) e quando o leito parou por completo e os valores atingidos foram acima de 6,5 Hz.

Gráfico 6 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=11\text{mL/min.}$  (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2018)

Os ensaios dos gráficos 7(a) e 7(b) foram executados considerando uma vazão de atomização de 15 mL/min para as mesmas concentrações de suspensão de 9% e 15%, respectivamente.

Ambos os sistemas estudados para a vazão de atomização de 15 mL/min apresentaram uma oscilação no valor de frequência central dentro de uma faixa constante. Quando atingido a região de instabilidade no leito, para os dois casos, houve alteração no padrão de oscilação que passou a ser crescente até o momento em que as partículas param sua movimentação. A partir desse instante, os valores de frequência passam a oscilar com valores acima de 6,0 Hz para o Gráfico 7a, e valores acima de 6,5 Hz para o Gráfico 7b.

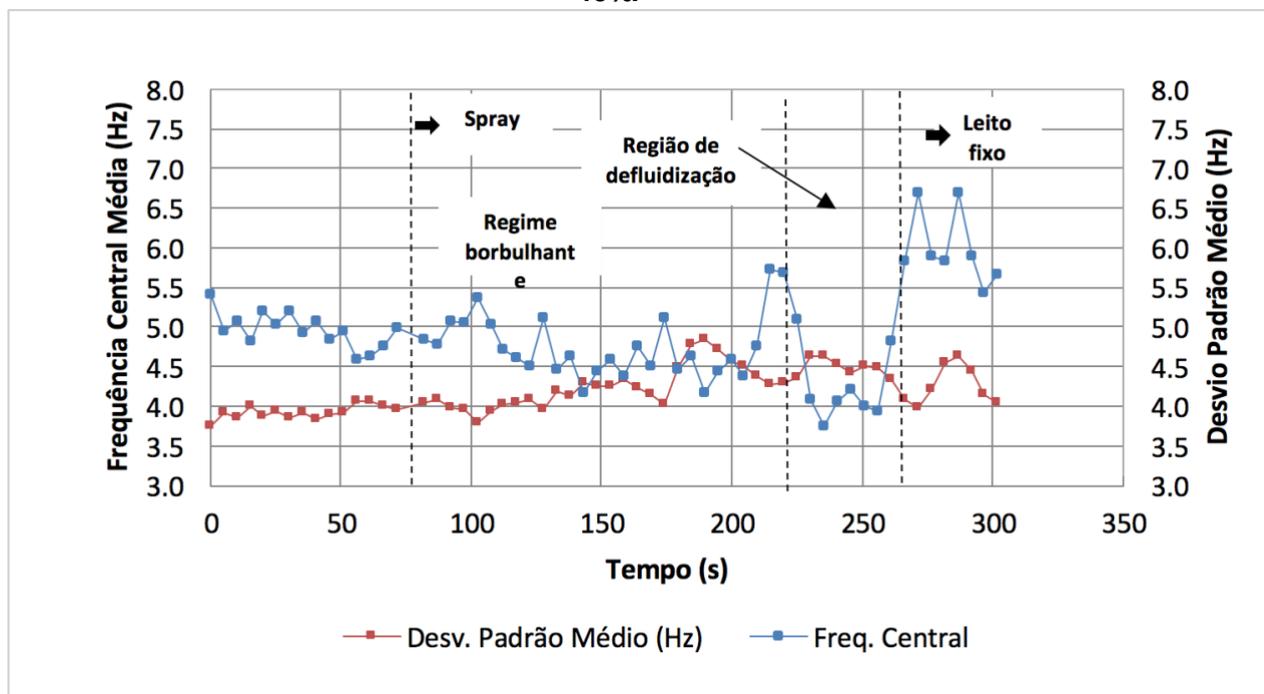
Verificou-se então, assim como apontado na literatura por Parise et al. (2007), que há sensibilidade da variação espectral na região de defluidização no leito, momento no qual espera-se um decréscimo acentuado nos valores de frequência central média posteriormente seguido por valores de frequência acima de 6,0 Hz para o sistema de partículas-fluido aqui estudados.

Observou-se também que quando houve o aumento da vazão de atomização da suspensão diluída (Gráficos 6b e 7b), o tempo com que o sistema atingia o colapso total foi maior partindo de 360s para 560s. Com o aumento da vazão de atomização, era esperado uma condição de maior acúmulo de material úmido dentro do leito comprometendo mais intensamente as taxas de transferência de calor e massa do sistema, e assim esperava-se que o fenômeno de defluidização fosse atingido em menos tempo, o que não ocorreu.

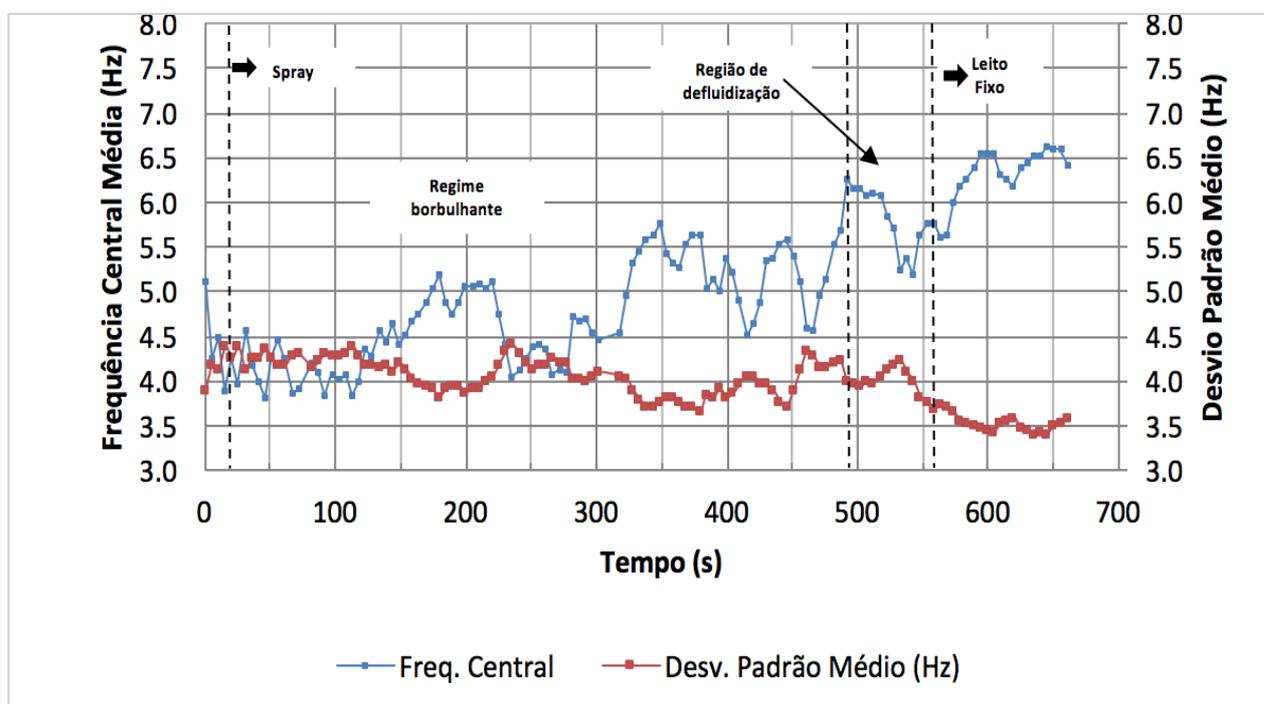
Algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar o comportamento atípico encontrado nesse estudo. A influência da vazão de atomização pode não ter ficado clara em razão da pequena diferença do fluxo que aumentou de 11 para 15 mL/min. Uma diferença de apenas 4 mL/min pode não ter sido suficiente para evidenciar a influência do aumento da vazão para esse caso.

Um outro ponto que pode ser levantado é quanto as condições do ar de entrada no sistema. As condições do ar que alimenta o sistema tem grande influência nos experimentos e uma análise mais aprofundada de perfis de umidade e condições atmosféricas podem ser empregadas para explicar o comportamento observado.

Gráfico 7 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=15$  mL/min. (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .



(a)



(b)

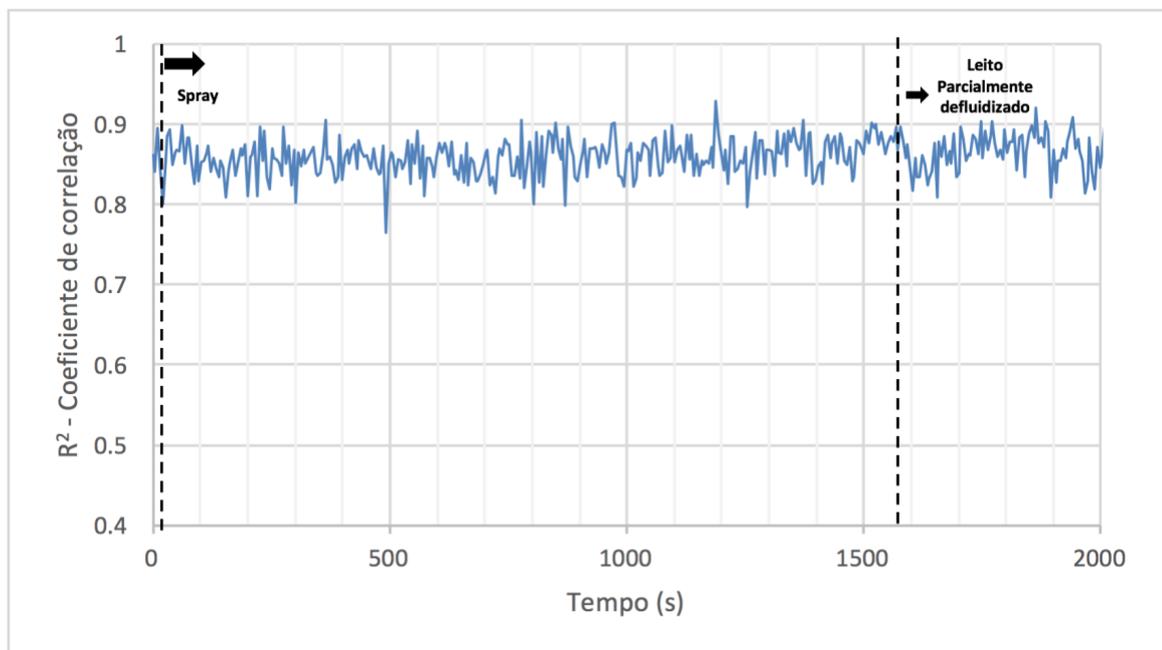
Fonte: Autoria Própria (2018)

### 5.3 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO - $R^2$

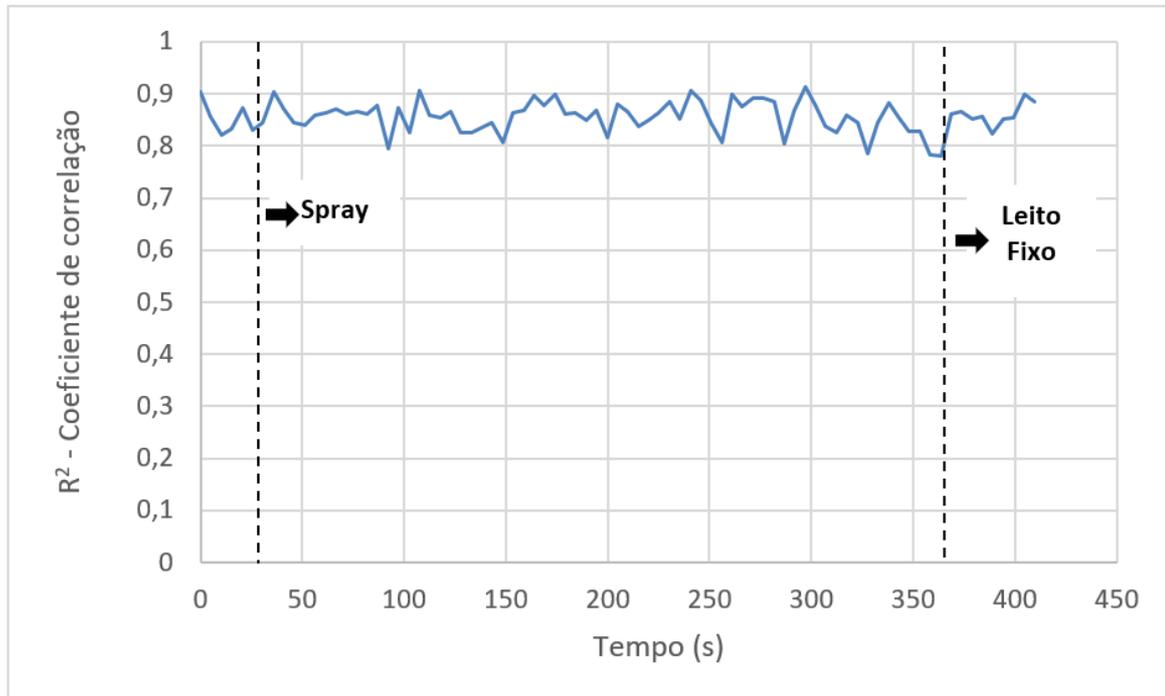
Os Gráficos 8 (a e b) e 9 (a e b) mostram a evolução o perfil de comportamento do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ao longo do processo de secagem. Esse parâmetro varia de 0 a 1 e expressa a relação de proximidade entre o ajuste dos espectros de amplitude medidos com o perfil exponencial da Gaussiana. Quanto mais próximo de 1 forem os valores observados ao longo do experimento, mais próxima é essa relação e mais expressivos são os resultados de frequência central encontrados. Assim como observado por Schaffka (2017), a medida que o leito vai sofrendo instabilidade e se aproximando da região de defluidização há uma alteração na característica do perfil de comportamento dos valores de  $R^2$ . Na região de defluidização observa-se um decréscimo nos valores do coeficiente. Esse comportamento ocorre devido a deformação do espectro de pressão perdendo a similaridade com o perfil da Gaussiana e assim a aproximação linear do método, nessa região, é menos expressiva.

Considerando a relação do coeficiente e seu comportamento ao longo do tempo, foi possível detectar a alteração no perfil de comportamento na região de instabilidade do leito para todos os casos, porém o decréscimo acentuado esperado para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) não foi claro. A causa para esse comportamento pode ser atrelada ao tamanho das partículas utilizadas que são consideravelmente menores quando comparadas as partículas de Schaffka et al. (2017). Para os casos aqui estudados, a deformação do espectro da amplitude de pressão pode ter sido consideravelmente menor e, portanto, não foi tão facilmente detectado.

**Gráfico 8 – Evolução do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) no ajuste do método da análise espectral Gaussiana em função do tempo de experimento. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=11\text{mL/min}$ . (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .**



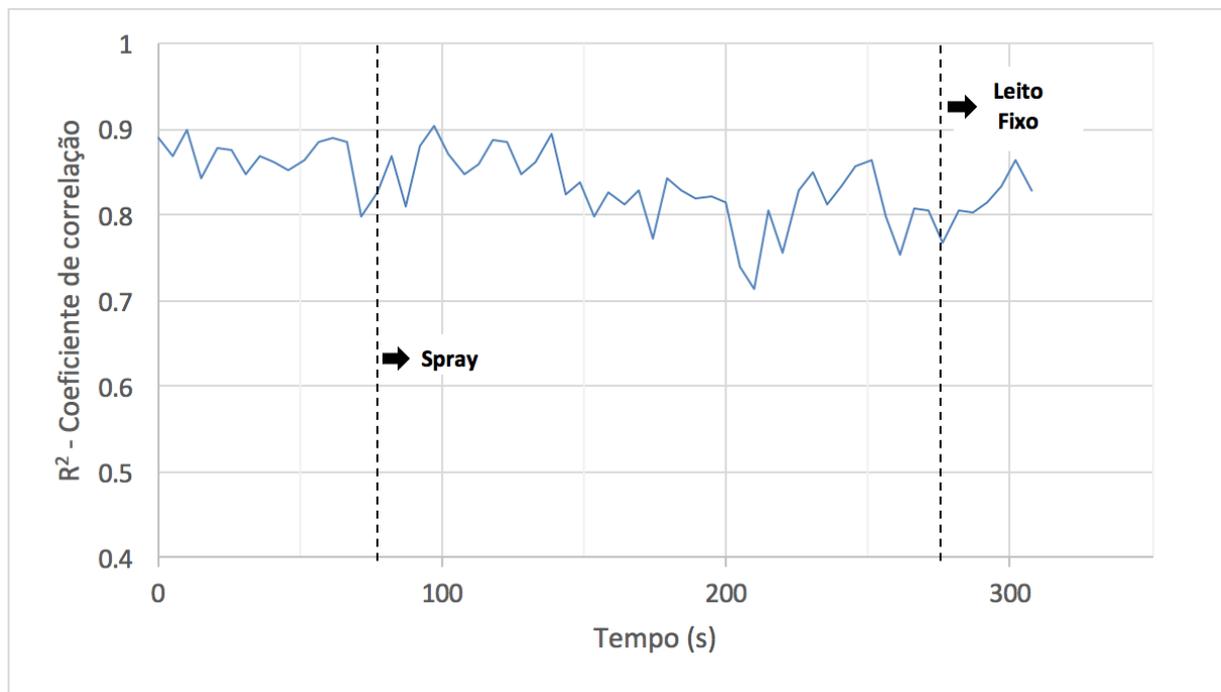
(a)



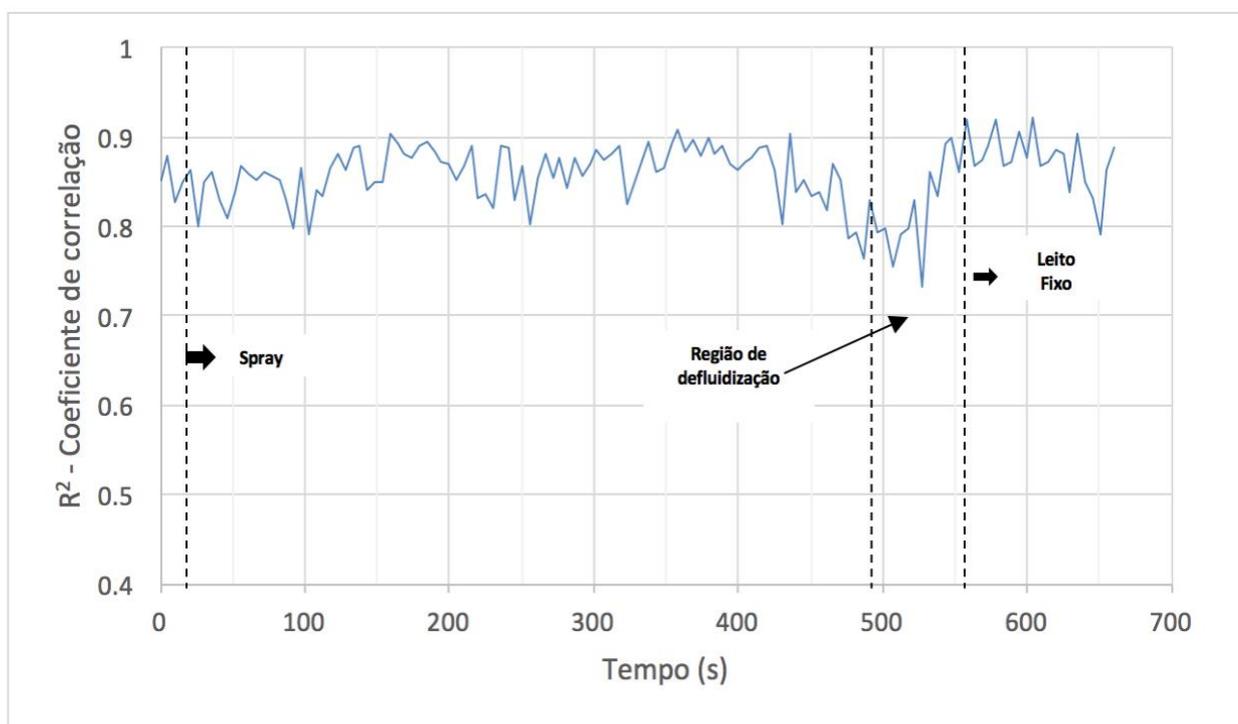
(b)

Fonte: Aatoria Própria (2018)

**Gráfico 9 – Evolução do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) no ajuste do método da análise espectral Gaussiana em função do tempo de experimento. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=15\text{mL/min}$ . (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .**



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2018)

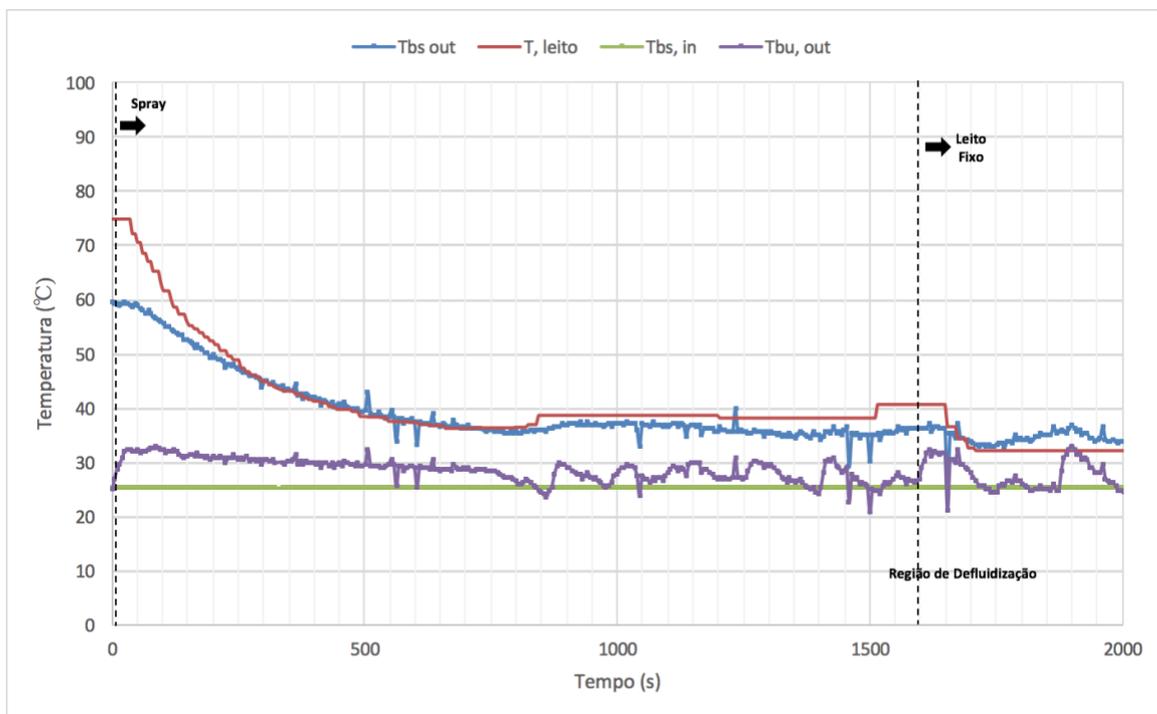
#### 5.4 PERFIS DE TEMPERATURA

O comportamento do perfil de temperatura (Gráficos 10a e 10b) do sistema fluidodinâmico em relação ao tempo, considerando uma vazão de 11 mL/min e concentrações de suspensão de 9% e 15% respectivamente. Para realização dos experimentos, como definido previamente, a temperatura do leito foi mantida em 85°C.

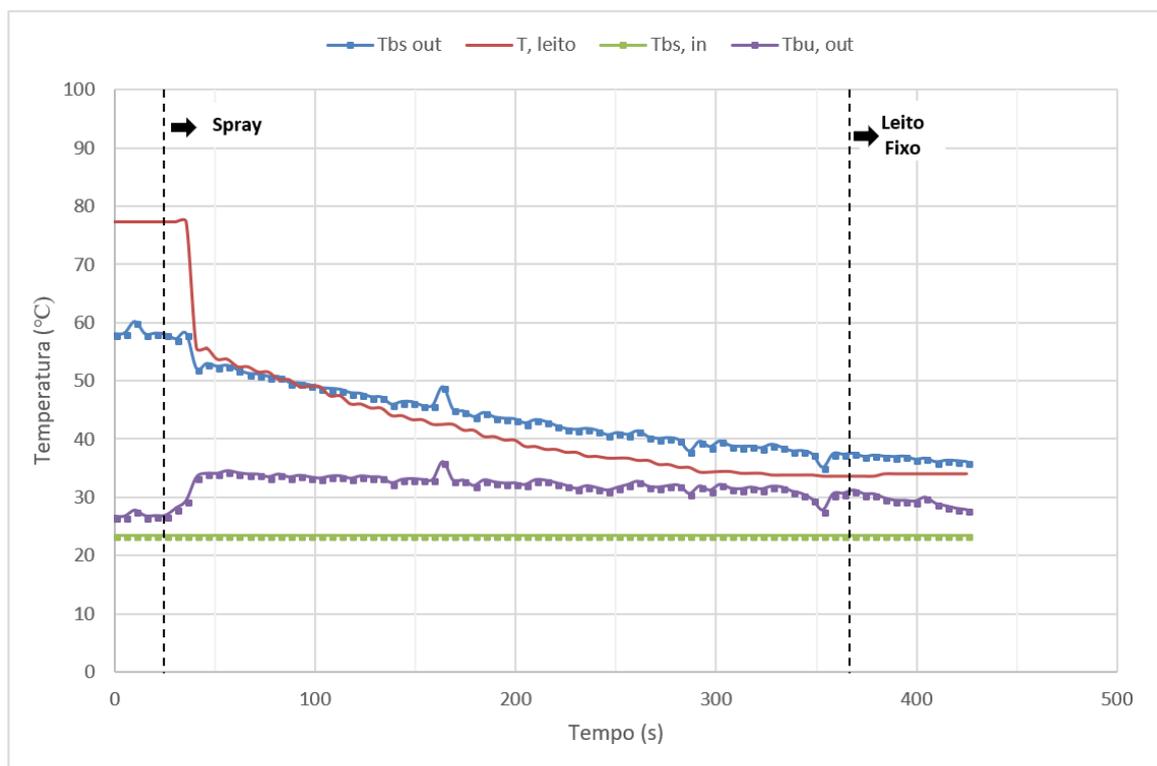
Ao analisar o aumento da concentração da condição 10a para a condição 10b observa-se que o sistema entra em colapso mais rápido para a suspensão mais concentrada (15%) do que na condição de suspensão de pasta mais diluída (9%), como esperado. Esse fato pode ser explicado com base na dinâmica de secagem do experimento. Com a introdução da suspensão diluída no leito as partículas são recobertas e envoltas em uma película fina e úmida de solução de carbonato de cálcio. Devido à presença de temperatura, a umidade é retirada da superfície da partícula e uma fina camada de material sólido fica encrustada na superfície da esfera de vidro até que, por efeitos abrasivos e choque do material inerte um contra o outro, essa partícula seja craquelada e removida por elutriação (MUJUMDAR, 2006).

Quando há maior concentração no sistema o depósito de material sob a superfície da partícula é maior, e assim o craquelamento e a elutriação da camada sólida na superfície não é veloz ao ponto de haver equivalência na quantidade de material que adentra o sistema e a quantidade que é elutriada. Com isso, há acúmulo de carbonato de cálcio na superfície das partículas tornando-as maiores e mais pesadas, até que o leito entra em colapso e a movimentação das partículas parem.

**Gráfico 10 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=11\text{ml/mL}$ . (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .**



(a)



(b)

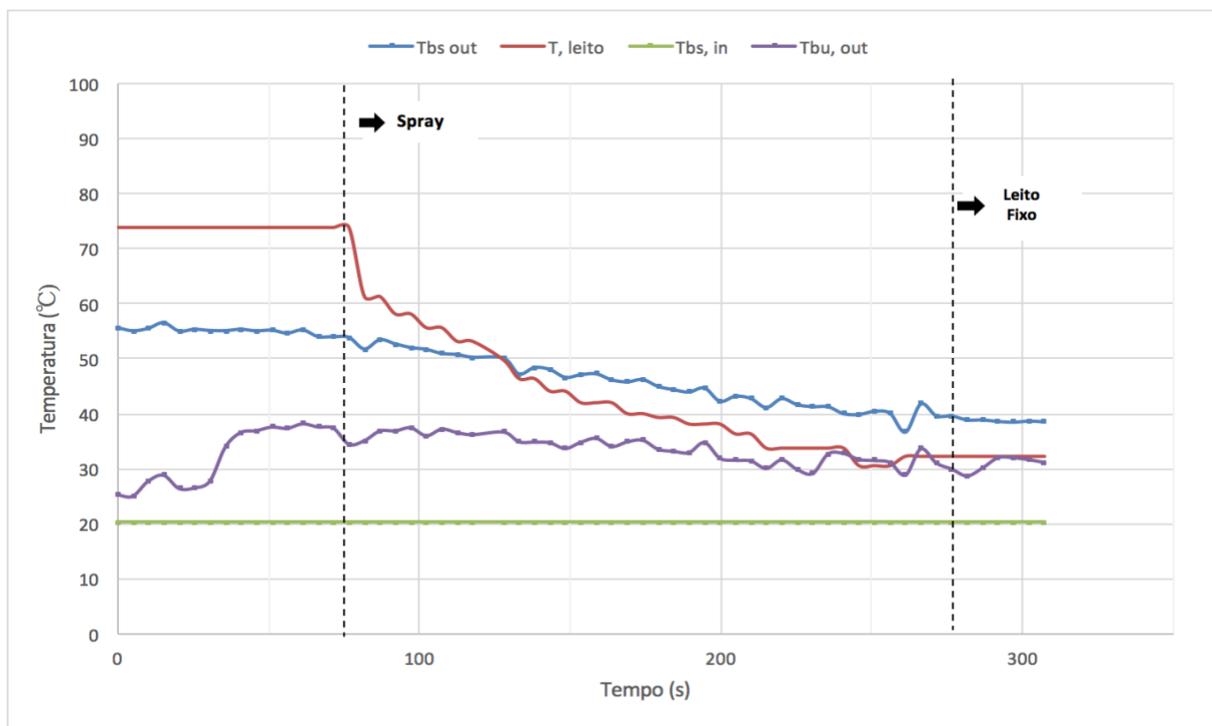
Fonte: Autoria Própria (2018)

O comportamento observado para os experimentos nos Gráfico 10 (a e b) foi reproduzível para os experimentos do Gráfico 11 (a e b). Após o início da atomização da suspensão no leito há um decréscimo exponencial da temperatura para as duas condições de experimento. Ao longo do tempo e próximo a condição de leito fixo, as temperaturas dentro do sistema tendem ao equilíbrio térmico.

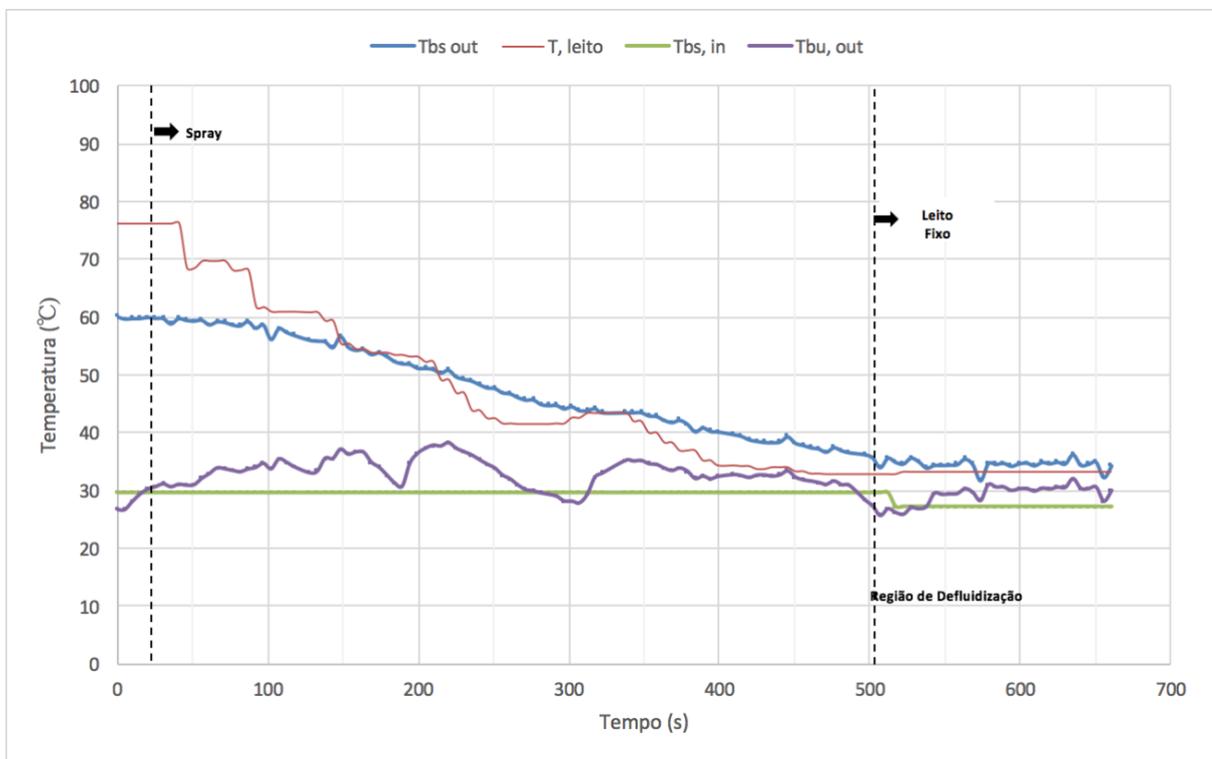
Foi observado que na condição de suspensão diluída 9% (Gráfico 11a) o tempo necessário para o leito adquirir instabilidade e entrar em colapso relativamente menor em comparação a condição de solução 15% (Gráfico 11b). Esse comportamento de primeiro momento pode parecer inesperado, no entanto uma análise mais profunda desse comportamento deve levar em consideração alguns fatores. A condição do ar atmosférico que alimenta o sistema exerce grande influência na aquisição de dados dos experimentos. Um dos fatores que pode explicar o comportamento observado é diferença de temperatura de entrada do ar no sistema em 10°C mais amena para a condição de 9% de concentração de carbonato de cálcio.

Uma segunda análise foi feita em relação ao teor de umidade do ar. Para a condição de expressa no Gráfico 11a foi encontrado um valor de umidade absoluta do ar de 0,01369 kgH<sub>2</sub>O/kg Ar Seco. Enquanto para a condição do Gráfico 11b o valor de umidade absoluta estava em torno de 0,0086 kgH<sub>2</sub>O/kg Ar Seco. Foi constatado então que na condição de suspensão mais concentrada ( $C_{\text{susp}} = 15\%$ ) o ar que alimentava o sistema estava em torno de 63% mais seco, considerando uma mesma vazão de atomização de solução de 15 mL/min, o sistema demandou mais tempo para umedecer e entrar em colapso. Em contrapartida, para a condição  $C_{\text{susp}} = 9\%$ , as propriedades do ar que alimentava o sistema estavam favoráveis ao colapso do leito, pois o mesmo apresentava uma condição de menor temperatura e maior teor de umidade.

**Gráfico 11 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}=15\text{mL/min}$ . (a)  $C_{susp}=9\%$ . (b)  $C_{susp}=15\%$ .**



(a)



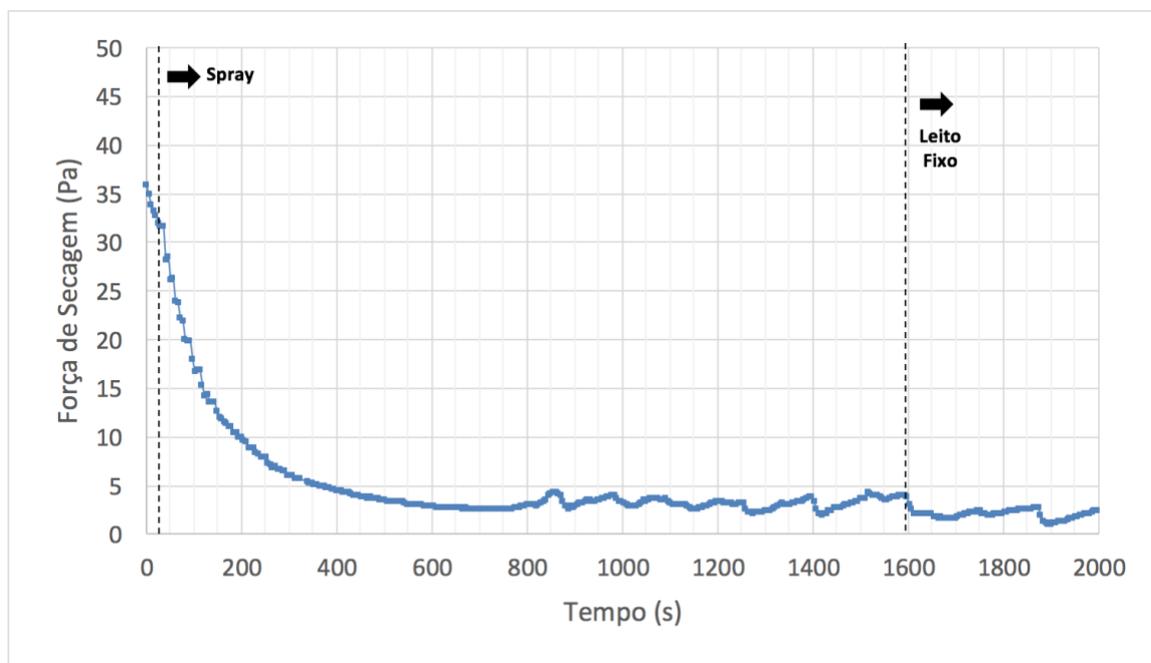
(b)

## 5.5 FORÇA DE SECAGEM

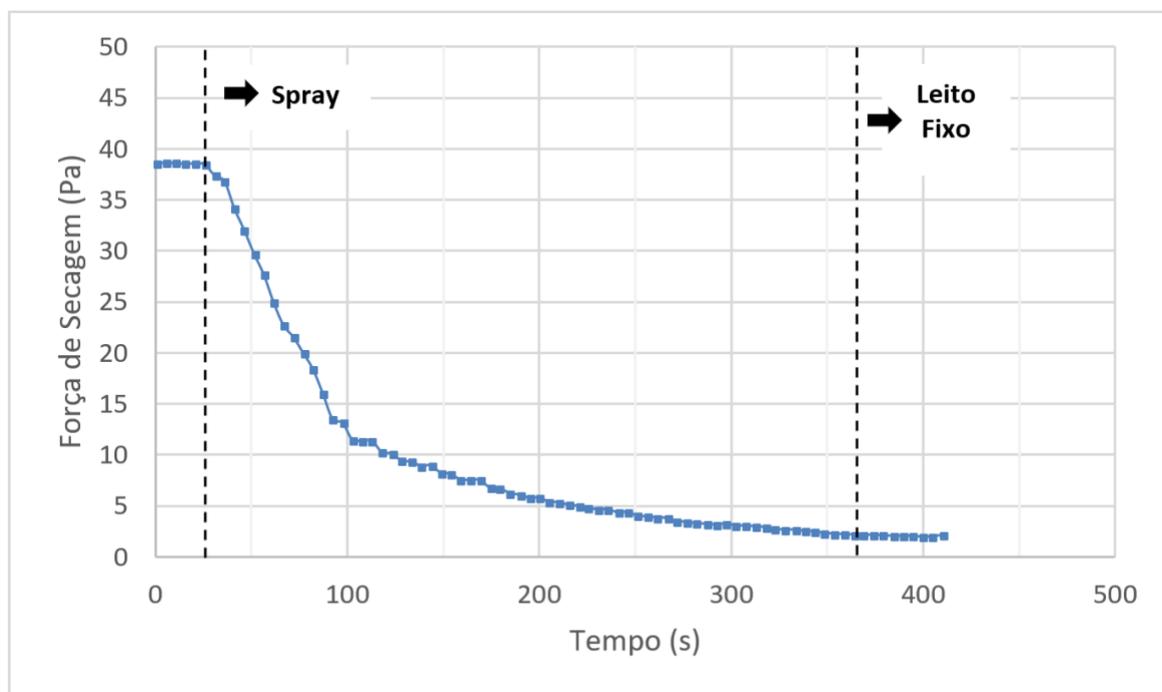
Os Gráfico 12 (a e b) e 13 (a e b) estão dispostos os a curva de força de secagem (DF) para as condições de  $Q_{\text{susp}} = 11 \text{ mL/min}$  e  $Q_{\text{susp}} = 15 \text{ mL/min}$  respectivamente, variando as concentrações de suspensão de carbonato em 9% e 15%.

Para a vazão de 11 mL/min no Gráfico 12 (a e b), confirmou-se a relação apontada por Schaffka (2017) na qual a força de secagem (DF) está direta e intimamente relacionada com a temperatura do leito e a umidade do ar. Pode-se realmente observar para ambas as condições dos Gráficos 12 (a e b) que a partir do momento que a solução de carbonato é inserida no sistema observa-se uma queda acentuada no valor da força de secagem (comportamento similar foi verificado anteriormente nos perfis de temperatura) e quando a condição de leito fixo é atingida os valores de DF mantêm-se abaixo de 5 Pa. Assim pode-se observar também que a medida que o valor de DF diminui, maior é a tendência de aglomeração das partículas.

**Gráfico 12 – Parâmetro de força de Secagem. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}= 11\text{mL/min}$ . (a)  $C_{susp}= 9\%$ ; (b)  $C_{susp}= 15\%$ .**



(a)

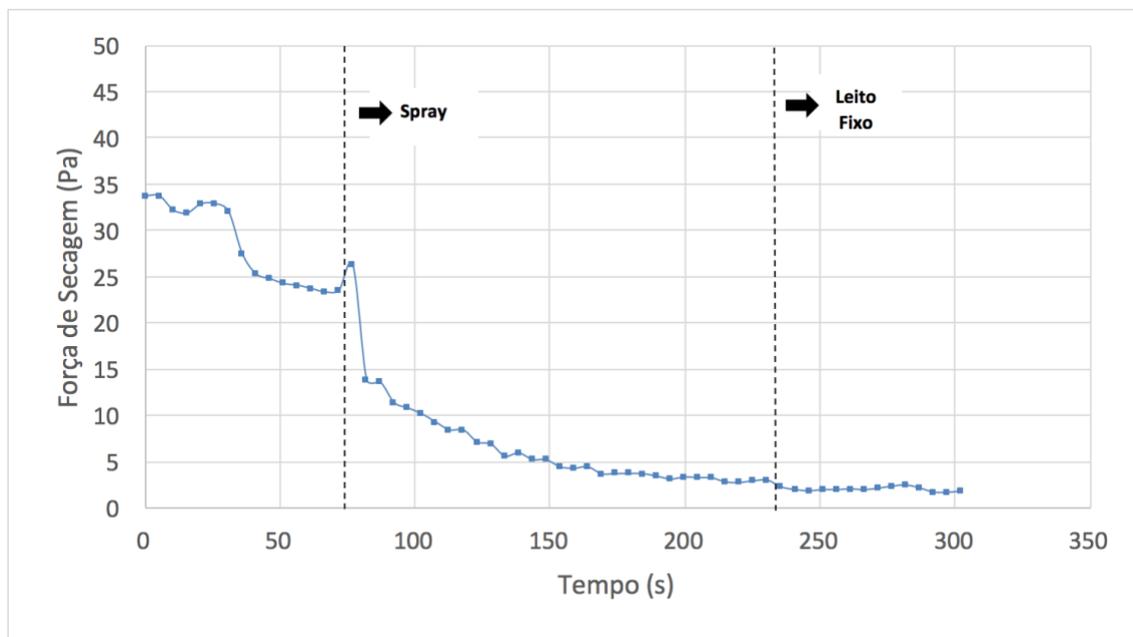


(b)

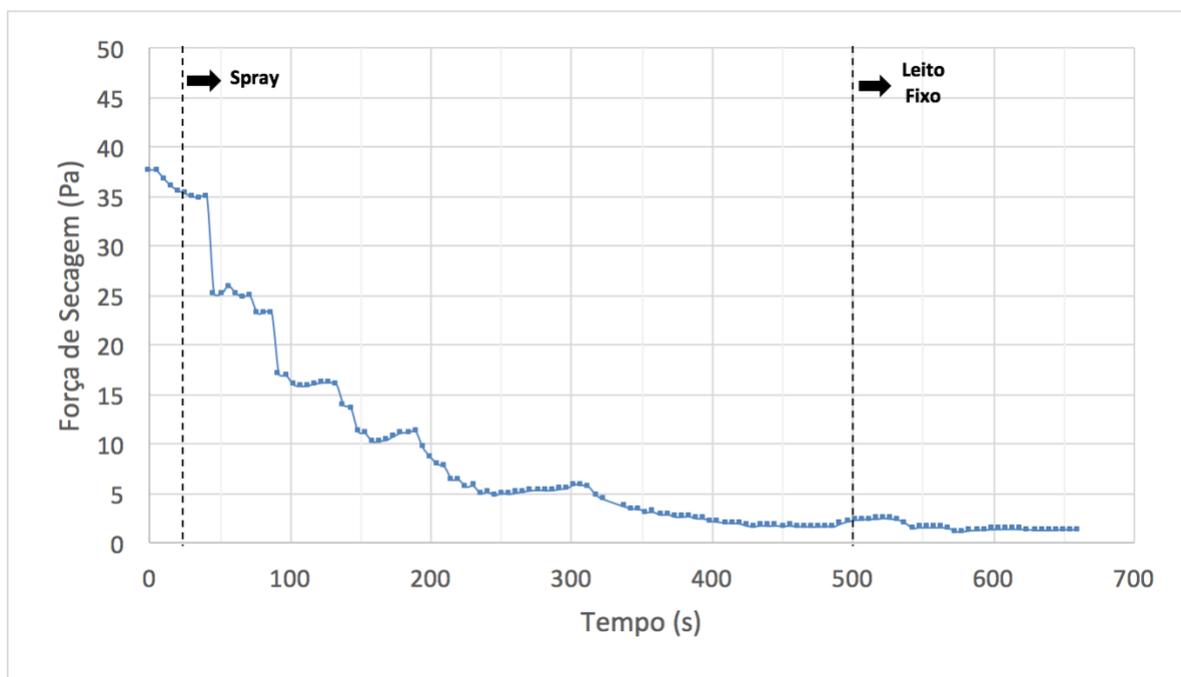
Para os Gráficos 13 (a e b) o comportamento observado para os Gráfico 12 (a e b) foram reprodutíveis. O mesmo comportamento de queda acentuada nos valores de DF com a inserção da solução no sistema, e ao atingir o leito fixo com valores abaixo de 5 Pa foi observado. Vale salientar que indiferentemente da vazão utilizada e da concentração da solução o comportamento da força de secagem para os 4 experimentos foi o mesmo, e atingiu ao final valores menos que 5 Pa e indicando que dentro do sistema a quantidade de material aglomerado foi semelhante.

O segundo ponto é salientar que esse parâmetro não é capaz de identificar a região de defluidização do sistema, e somente indica a tendência do material de aglomerar.

Gráfico 13 – Parâmetro de Força de Secagem. Condições Operacionais: Esfera de Vidro,  $Q_{susp}= 15\text{mL/min}$ . (a)  $C_{susp}= 9\%$ ; (b)  $C_{susp}= 15\%$ .



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2018)

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse capítulo, as conclusões referentes a esse trabalho serão apresentadas juntamente com as sugestões para eventuais trabalhos que possam surgir no futuro.

### 6.1 CONCLUSÕES

Com os experimentos realizados nesse presente trabalho pode-se então chegar as seguintes conclusões:

- O método de análise espectral Gaussiana foi aplicado como método de análise do processo de secagem de pasta.
- De maneira geral, o coeficiente de correlação apresentou alteração do seu perfil de oscilação ao longo do tempo na região de defluidização.
- Os perfis de temperatura, para todos os experimentos, apresentaram tendência de equilíbrio térmico entre as temperaturas do leito e do ar na saída da coluna com a temperatura do ar na entrada do sistema.
- A força de secagem, para todos os experimentos, constatou a tendência de aglomeração das partículas inertes no sistema, apresentando um perfil de comportamento característico e reprodutível independente da vazão ou concentração da solução de carbonato atomizada no sistema.
- Quanto a concentração e vazão da solução atomizada no sistema houve pouca influência nos experimentos realizados, e apresentou maior interferência no tempo necessário para atingir a região de defluidização do leito e atingir o colapso do sistema.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Quanto à fluidodinâmica dos experimentos, utilizar diferentes diâmetros de partícula inerte para tentar entender melhor o espectro de detecção da análise espectral Gaussiana.
- Utilizar material inerte com capacidade de transferência térmica distintas.
- Utilizar diferentes relações de velocidade superficial do ar pela velocidade de mínima fluidização.
- Quanto ao processo de secagem, utilizar diferentes tipos de suspensão de pasta e analisar suas influências, mudanças e comportamento no sistema. Utilizar também diferentes temperaturas do leito para o processo de secagem.
- Realizar simulações CFD de transferência de calor para entender melhor a tendência de equilíbrio térmico entre as temperaturas de entrada do ar, temperatura do leito e a temperatura de bulbo úmido na saída.

## REFERÊNCIAS

- AJBAR, A., K. ASIF, M. **Improvement of the fluidizability of cohesive powders through mixing with small proportions of group particles**, Canadian Journal of Chemical Engineering 83 (2005) 930.
- ALI, S. S. et al. **Effect of Frequency on Pulsed Fluidized Beds of Ultrafine Powders**. *Journal Of Nanomaterials*. v. 2016, p.1-12, 2016. Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4592501>.
- COELHO, H. K. **Fluidodinâmica de Misturas Binárias em Leito Fluidizado Gás-Sólido Usando Medidas de Flutuação de Pressão**. In: XIX SICITE, 19., 2015, Ponta Grossa. Relatório. Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. p. 1 - 8.
- DING, P. Páček, A.W. **De-agglomeration of goethite nano-particles using ultrasonic comminution device**. *Powder Technology* 187 (2008) 1–10.
- DONG, Liang et al. **Effect of active pulsing air flow on gas-vibro fluidized bed for fine coal separation**. *Advanced Powder Technology*. set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.08.012>.
- GELDART, D. **Types of fluidization**, *Powder Technology*. 7 (1973) 285–292.
- GÓMEZ-HERNÁNDEZ, Jesús et al. **Agglomeration detection by pressure fluctuation analysis during *Cynara cardunculus* L. gasification in a fluidized bed**. *Chemical Engineering Journal*, [s.l.], v. 284, p.640-649, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.044>.
- GRACE, J., AVIDAN, A., KNOWLTON, T. **Circulating Fluidized Beds**. Blackie Academic & Professional: London, 585 p, 1997.

HE, H. et al. Statistical and frequency analysis of the pressure fluctuation in a fluidized bed of non-spherical particles. **Particuology**, China, v. 16, p.178-186, 03 fev. 2014.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2a. ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1991.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Taylor & Francis Group, 2006.

MEILI, L. **Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**. 2009. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

PARISE, M. R. **Aplicação da Distribuição Espectral Normal em Leito Fluidizado**. 2007. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PARISE, M. R. et al. **Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution**. *Powder Technology*, v. 206, p.149-153, 2011.

PARISE, M. R. et al. **Detecção da defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando medidas de flutuação de pressão**. In: XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 2013, La Plata (Argentina). XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, v. 01. p. 1534-1539, 2013.

SAIDI, M. et al. **Pulsating flow effect on the segregation of binary particles in a gas-solid fluidized bed**. *Powder Technology*, [s.l.], v. 264, p.570-576, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.003>.

SCHAFFKA, F. T. S. **Análise Fluidodinâmica e Térmica do Processo de Secagem de Suspensão Diluída em Leito Fluidizado**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SILVA, C. A. M. et al. **Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution.** Powder Technology, v. 212, p.445-458, 2011.

SILVA, C. A. M. da. **Aplicação de Tecnologias Analíticas de Processo e Inteligência Artificial para Monitoramento e Controle de Processo de Recobrimento de Partículas em Leito Fluidizado.** 2015. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design.** New York: Gordon and Breach Science, 1986, 448 p.

TERRON, L. R. **Operações Unitárias para Químicos Farmacêuticos e Engenheiros: Fundamentos e Operações Unitárias do Escoamento de Fluidos.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012. 589 p.

WELTMAN, R.M. **Reology.** Vol. 3. Academic Press. New York. 1960

YU, Q. J. Quevedo, Rajesh N. Dave, Robert Pfeffer, Chao Zhu. **Fluidization of nanoparticle agglomerates with the assistance of magnetic particles in an oscillating magnetic field.** AIChE Journal 51 (2005) 1971–1979